

Eine histologische Strukturanalyse der basalen Hirnarterien mit Berücksichtigung der Histogenese

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung
der Philosophischen Doktorwürde

vorgelegt der
Philosophischen Fakultät II
der Universität Zürich

von
HANS-KONRAD SCHMUTZ
von Winterthur und Vechigen (Kt. Bern)

Begutachtet von den Herren
Prof. Dr. St. Kubik und Prof. Dr. J. Biegert



Juris Druck + Verlag Zürich
1981

1982

Eine histologische Strukturanalyse der basalen Hirnarterien mit Berücksichtigung der Histogenese

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung
der Philosophischen Doktorwürde

vorgelegt der
Philosophischen Fakultät II
der Universität Zürich

von
HANS-KONRAD SCHMUTZ
von Winterthur und Vechigen (Kt. Bern)

Begutachtet von den Herren
Prof. Dr. St. Kubik und Prof. Dr. J. Biegert



Juris Druck + Verlag Zürich
1981

ISBN 3 260 04917 7

INHALTSVERZEICHNIS

I. EINLEITUNG

II. MATERIAL UND METHODE

III. DIE ELASTISCHEN ELEMENTE

- a.) Die Membrana elastica interna
- b.) Die elastischen Grenzlamellen zwischen
Tunica media und Tunica adventitia

IV. DIE SCHWACHSTELLEN IN DER TUNICA MEDIA

- a.) Der histologische Aufbau
- b.) Häufigkeit und Verteilung der Schwachstellen
- c.) Die Entwicklung der einzelnen Einkerbung

V. DIE INTIMAPOLSTER

- a.) Der histologische Aufbau
- b.) Unterteilung der Intimapolster
- c.) Häufigkeit und Verteilung der Polstergruppen

d.) Lage der Intimapolster an ausgewählten Schnittstellen

- 1.) Konfluens der beiden Vertebralarterien zur A. basilaris (Schnittstelle 13)
- 2.) Bifurkation der A. basilaris (Schnittstelle 11)
- 3.) Verzweigung der A. carotis interna in ihre Endäste (Schnittstelle 4)
- 4.) Die A. communicans anterior (Schnittstelle 2)

e.) Überlegungen zur Funktion und Entstehungsweise der Intimapolster

VI. STICHWORTARTIGE CHARAKTERISIERUNG EINZELNER ABSCHNITTE DES CIRCULUS ARTERIOSUS

a.) Abschnitte aus dem Versorgungsgebiet der A. carotis interna

- 1.) Die Verzweigung der A. carotis interna in ihre Endäste
- 2.) Die Pars sphenoidalis a. cerebri media
- 3.) Die Partes prae- et postcommunicalis a. cerebri anterior
- 4.) Die A. communicans anterior
- 5.) Die A. communicans posterior



b.) Abschnitte aus dem Versorgungsgebiet
der A. vertebralis

1.) Die A. vertebralis

2.) Die A. basilaris

3.) Die A. cerebri posterior

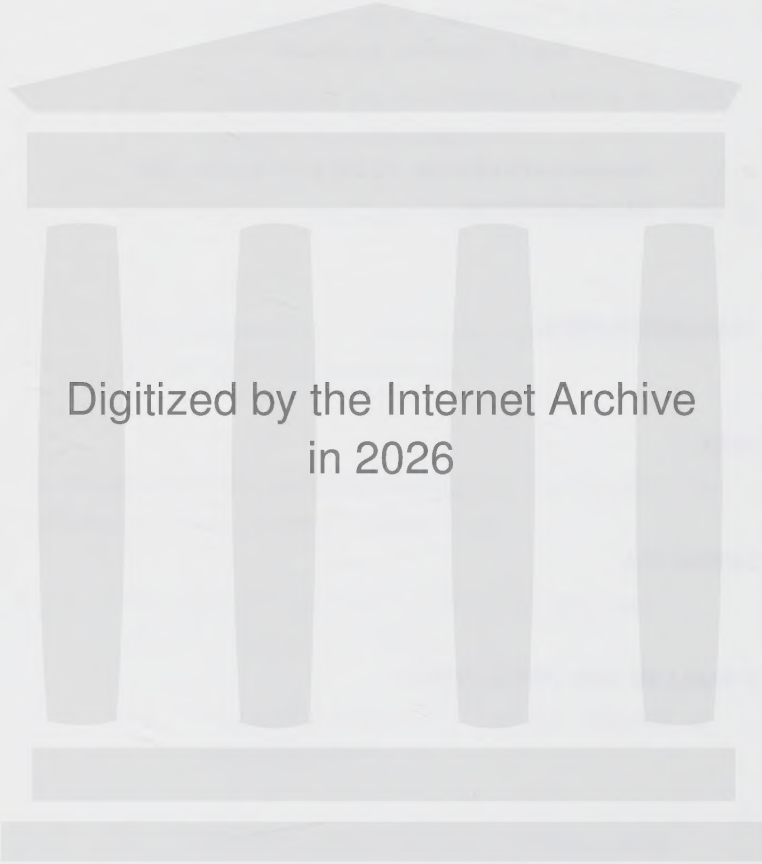
c.) Zusammenfassende Interpretation der
Einzelbefunde

VII. ZUSAMMENFASSUNG

VIII. DANK

IX. LITERATUR

X. TABELLEN UND ABBILDUNGEN



Digitized by the Internet Archive
in 2026

I. EINLEITUNG

Von den vergleichbaren Körperarterien unterscheiden sich die Hirnarterien dadurch, dass sie dünnwandiger sind und dass die einzelnen Schichten sich am Wandbau qualitativ anders beteiligen. So ist der prozentuale Anteil der Muskelfasern bei den Hirnarterien zwar um 13% höher als bei der A. mesenterica, ihr Gehalt an kollagenen Fasern ist dagegen um etwa 10% und an elastischen Elementen gar um etwa 1/3 reduziert (LANG, 1965). Die Tatsache, dass die Reduktion in erster Linie die passiven und nicht die aktiven Wandelemente betrifft, deutet auf eine andersartige Beanspruchung und Aufgabe der Arterienwand hin. Da Hirnarterien und Hirnvenen nicht nebeneinander verlaufen, kann die arterielle Pulswelle nur über den Liquor auf die Venen übertragen werden. So stellt der Liquor eine Komponente des intrakraniellen Kopplungsmechanismus dar.

Betrachtet man den Liquormantel als funktionellen Wandbestandteil, so wird verständlich dass die Hirnarterien vor äusseren Krafteinwirkungen weitgehend geschützt sind und weshalb die Tunica externa nur schwach ausgebildet ist. Die Tunica media wird beim Eintritt einer Arterie in die Schädelhöhle auf die Hälfte ihres Durchmessers reduziert. In diesem, nun deutlich dünneren Muskelmantel sind die Zellen cirkulär oder spiralg angelegt. Diese Zellanordnung und die kräftig ausgebildete Membrana elastica interna wirken gegen den von innen angreifenden Blutdruck. Eine äussere elastische Membran fehlt, wenngleich die Grenzzone zwischen Tunica media und Tunica

adventitia mit einzelnen elastischen Fasern durchsetzt ist. Zum Lumen hin ist die Wand durch die Tunica intima abgeschlossen. Diese Endothelauskleidung ist in ihrem Aufbau identisch mit den entsprechenden Schichten bei Körperarterien.

Durch die Einführung und Verfeinerung von röntgenologischen Untersuchungsmethoden sowie durch die grossen Fortschritte der vaskulären Mikrochirurgie geriet der Hirnkreislauf zunehmend in den Brennpunkt klinischen Interesses. Eine Vielzahl klinischer Beobachtungen wurde publiziert. Daraus ging hervor, dass einzelne Abschnitte des Circulus arteriosus verschieden häufig erkranken. Stellvertretend für eine Vielzahl cerebrovaskulärer Störungen sei auf die ungleiche Verteilung der Aneurysmen (vgl. PIA, 1979) und der Prädilektionsstellen arteriosklerotischer Plaques (vgl. TOOLE und PATEL, 1980) verwiesen.

Aus der geschilderten Präferenz einzelner Abschnitte des Circulus arteriosus für pathologische Prozesse ergibt sich die Frage, ob alle Arterienabschnitte an der Hirnbasis denselben Aufbau zeigen.

In der Literatur finden sich viele Einzelbeobachtungen, doch fehlt es oft an einem umfassenden Untersuchungsgut. In systematischen Studien, wie z.B. in der von HASSLER (1961,a) wurde nur eine beschränkte Anzahl an Schnittstellen verglichen.

Das Ziel der vorliegenden Studie besteht darin, alle Abschnitte des basalen Arterienringes aufzuarbeiten und zu vergleichen. Weiter sollen die Befunde in einen funktionsmorphologischen Zusammenhang gestellt werden.

II. MATERIAL und METHODE

Zur Untersuchung gelangten Abschnitte des Circulus arteriosus cerebri von 44 Individuen.

Schnittserien von je vier Embryonen und Feten wurden analysiert, um allfällige histogenetische Unterschiede der einzelnen Schnittstellen darstellen zu können. Alle Präparate dieser Gruppe stammen aus der Sammlung des Anatomischen Institutes der Universität Zürich.

Den Hauptanteil des Untersuchungsgutes bilden die Circuli von Kindern und Erwachsenen. Das Altersspektrum reicht von 9 Tagen bis 60 Jahren. Da sich Strukturänderungen im Erwachsenenalter langsamer manifestieren als während des embryonalen und postnatalen Wachstums wurde das vorhandene Material in zwei Gruppen unterteilt. Die eine umfasst die Altersstufe der Kinder und Jugendlichen, die andere die der Erwachsenen. Aus dem oben erwähnten Grund wurden die Gruppen in weitere Teilgruppen unterteilt, wobei das Intervall für die erstere 5 Jahre beträgt und für die zweite 10 Jahre. Dieser Teil des Untersuchungsgutes stammt aus der Abteilung für Neuropathologie des Institutes für Pathologie und aus dem Gerichtlich-medizinischen Institut der Universität Zürich. Aufgrund der Angaben in Krankengeschichte und Sektionsprotokoll wurden nur solche Fälle ausgewählt, bei denen kein Hinweis auf cerebrovaskuläre Erkrankungen bestand.

Um die Beobachtungen an Material unterschiedlicher Individuen und Altersklassen sowie von Schnittstellen unterschiedlicher Lage am Circulus vergleichen zu können, wurden am Circulus arteriosus 14 verschiedene Schnittstellen definiert. Bei deren Auswahl wurde das Lokali-

sationsmuster von Aneurysmen mitberücksichtigt (LOCKSLEY, 1966; KRÄYENBUHL und YASARGIL, 1972) sowie auch die Verteilung der arteriosklerotischen Plaques (QUANDT und SOMMER, 1969). In der Abb.1 sind die einzelnen Schnittstellen zur Darstellung gebracht.

- Schnittstelle 1 : Querschnitt durch die Pars post-communicalis a. cerebri anterior (A_2)
- Schnittstelle 2 : Umfasst die A. communicans anterior
- Schnittstelle 3 : Querschnitt durch die Pars prae-communicalis a. cerebri anterior (A_1)
- Schnittstelle 4 : Es handelt sich um die asymmetrische Aufzweigung der A. carotis interna in die A. cerebri media und die A. cerebri anterior. Beim Erstellen der Schnittserien wurde darauf geachtet, dass die Schnittebene mit der Flussrichtung des Blutes in der A. carotis interna einen Winkel von 90° einschloss.
- Schnittstelle 5 : Proben der Pars sphenoidalis a. cerebri media (M_1).
- Schnittstelle 6 : Die entnommenen Segmente umfassen die Verzweigung der A. cerebri media am Übergang der Pars sphenoidalis in die Pars insularis.
- Schnittstelle 7 : Ursprung der Pars carotica a. communicans posterior aus der A. carotis interna
- Schnittstelle 8 : Querschnitt durch die Pars carotica a. communicans posterior
- Schnittstelle 9 : Abzweigung der Pars carotica a. communicans posterior aus der A. cerebri posterior
- Schnittstelle 10 : Proben der A. cerebri posterior

- Schnittstelle 11 : Bifurkation der A. basilaris in die paarig angelegten A. cerebri posteriores
- Schnittstelle 12 : Mittlerer Abschnitt der A. basilaris
- Schnittstelle 13 : Zusammenfluss der beiden Vertebralarterien zur A. basilaris.
- Schnittstelle 14 : Querschnitt durch die Pars intracranialis der A. vertebralis

Die 336 aufgearbeiteten Proben verteilen sich auf die oben definierten 14 Schnittstellen. Davon stammt eine Gruppe von 135 Proben von Embryonen und Feten, während das postnatale Untersuchungsgut aus 201 Proben besteht. Wie aus der Abb. 2 zu entnehmen ist, verteilt sich das Untersuchungsgut unregelmässig auf die Schnittstellen. Dies liegt darin begründet, dass nicht in allen Fällen das ganze Gehirn bzw. die vollständige Hirnbasis zur Untersuchung vorlag.

Die einzelnen Proben wurden in 4%-igem Formol fixiert. Von allen Präparaten wurden entweder lückenlose Serien angefertigt oder mindestens jeder zehnte Schnitt berücksichtigt. Das embryonale Untersuchungsgut wurde mit Haematoxilin-Eosin gefärbt. In einem Fall konnte auf eine bestehende, mit Hämalalaun-Eosin-Orange gefärbte Serie zurückgegriffen werden. Diese stammte aus der Sammlung des Anatomischen Institutes der Universität Zürich. Bei den fetalen, sowie bei allen postnatalen Proben wurden die Schnitte abwechselnd mit Haematoxilin-Eosin und Resorcin- Van Gieson gefärbt (ROMEIS (1968), § 1604).

Um die Lage der Intimapolster an vier ausgewählten Schnittstellen beschreiben zu können, wurden von 40, als lückenlose Serien aufgearbeiteten Proben, graphische Rekonstruktionen angefertigt. Aus dieser Gruppe wählten wir Fälle aus, welche entweder die am häufigsten vorkommende Polsteranordnung oder eine seltene Variante zeigten. Von diesen Proben fertigten wir plastische Rekonstruktionen an. Hierzu eigneten sich Wachsplatten von einem Millimeter Dicke am besten. Es wurden elf Wachsplattenmodelle im Massstab 25:1 hergestellt. Weiter wurde die gesamte Hirnbasis eines Embryos (SSL 25mm) mit dem zugehörigen Arterienring plastisch rekonstruiert. Da die Anordnung der Schnittstellen bei Erwachsenen deutlich verschieden ist von der bei embryonalen Circuli waren Rekonstruktionen ein unerlässliches Hilfsmittel bei den embryologischen Untersuchungen.

III. DIE ELASTISCHEN ELEMENTE

Die elastischen Elemente konnten in allen Abschnitten der Arterienquerschnitte nachgewiesen werden. Eine Konzentration elastischer Fasern, die Membrana elastica interna, markiert die Grenze zwischen der Intima und der Tunica media. Eine zweite, allerdings weniger stark ausgeprägte Anhäufung trennt die Muskelschicht vom kollagenen Gewebe der Tunica adventitia. Dazwischen liegen korkzieherartig gewundene Einzelfasern, die in sehr unterschiedlicher Dichte vorkommen können (HASSLER, 1962a).

Von den elastischen Elementen möchten wir in erster Linie das unterschiedliche Erscheinungsbild der Membrana elastica interna darstellen und über die Dichte in der Grenzzone zwischen der Muskelschicht und der Tunica adventitia Auskunft geben.

a.) Die Membrana elastica interna

Die Membrana elastica interna wird "wellblechartig gefaltet" oder als "homogene Wellenlinie" charakterisiert (BARGMANN, 1977; BUCHER, 1977; KÜHNEL, 1978). Mehrere Autoren haben bereits auf Altersveränderungen hingewiesen (BENNINGHOFF, 1930; REUTERWALL, 1923; HIERONYMI, 1956). Mehrfach wurde auch ein Zusammenhang zwischen Veränderungen der Membrana elastica interna und pathologischer Prozesse postuliert und experimentell bewiesen (DAHL, 1976; HASHIMOTO, 1978).

Vom kontinuierlichen, einfachen Bau, welcher als Grundmuster der Lamina elastica interna betrachtet wird, gibt es oft Abweichungen. Die Membrana kann verdoppelt sein, sich in dünne Lamellen aufsplintern und verdickt, oder aufgequollen erscheinen. Im letzteren Fall spricht DÖRFLER (1935) von einem rosenkranzartigen Aussehen, während HIE-RONYMI (1956) dafür den Ausdruck "Raupenkettenelastica" geprägt hat. Die Veränderungen können lokal beschränkt erscheinen, oder sich über einen beträchtlichen Sektor des Querschnittes erstrecken. Die Abweichungen vom kompakten Bau werden meist als degenerative Vorgänge betrachtet. Ihr frühes Auftreten spricht eher dafür, dass es sich hier wenigstens bis zu einem gewissen Grade um haemodynamisch bedingte Anpassungen handelt.

Bis zu einer Länge von 96 mm zeigte keiner der Foeten eine ausgebildete Membrana elastica interna. RICKENBACHER (1972) beschrieb erste Spuren an der A. cerebri media eines Foeten von 110 mm SSL. Als zusammenhängendes Band konnten wir die Membran erstmals in der 20. Schwangerschaftswoche darstellen. Der kontinuierlich einfache Aufbau wurde an allen 11 Proben dieses Foeten nachgewiesen. Das gleiche gilt auch für den Circulus arteriosus eines Foeten von 210 mm SSL. Abweichungen vom Grundmuster zeigte die elastische Membran schon bei einem Foet von 300 mm SSL. Es handelte sich dabei um isolierte, kleine Spaltungen an mehreren Stellen des Arterienquerschnittes. Betroffen waren lediglich die beiden Vertebralarterien und deren Vereinigungsstelle zur A. basilaris (Schnittstelle 13, 14 beiderseits).

Bereits im Kindesalter können alle erwähnten Veränderungsarten beobachtet werden. Bei Kindern bis etwa zum 9. Lebensjahr lassen sich Duplikationen und Aufsplitterungen in der-

selben Häufigkeit nachweisen. Individuen der 2. Altersgruppe (10 - 19¹¹/12 jährig) zeigen eine deutliche Verschiebung zu Gunsten des aufgesplitterten Zustandes (Tab. IV). Wenngleich die errechneten Prozentwerte in den folgenden Altersgruppen leichten Schwankungen unterworfen sind, so zeigen sie doch alle einen sehr hohen Anteil an Aufsplitterungen. Dieser Umstand lässt den Schluss zu, dass der Degenerationsprozess von einer anfänglichen Duplikation der elastischen Membran in eine zunehmende Auffächerung übergeht.

Nebst der beschriebenen Auffächerung konnte mit zunehmendem Alter auch häufig die Membrana elastica interna als stark verdicktes Band zur Darstellung gebracht werden. Die deutlichste Zunahme zeigt der Vergleich der Gruppe der 30 bis 39¹¹/12 Jährigen mit der der 40 Jährigen und Älteren. Wie aus der Tabelle IV hervorgeht, steigt der Anteil der Verdickungen von 36,5% im Alter auf 75%.

Eingangs wurde auf die möglichen Quellungen und Einkerbungen in der lumenwärts gerichteten Oberfläche verwiesen, welche der elastischen Membran ein rosenkranzartiges Aussehen verleihen. Dies konnte an Foeten nur selten festgestellt werden. Demgegenüber zeigen Proben von Kindern deutliche Einkerbungen. Innerhalb der ersten Altersstufe (0 - 9¹¹/12 Jährige) trifft dies bereits schon für 71% der untersuchten Proben zu (Tab. IV). Dieser Anteil vergrößert sich von Altersstufe zu Altersstufe. Ein Maximum wurde bei den Individuen des vierzigsten Lebensjahres und darüber beobachtet.

Für das Zustandekommen der beschriebenen Veränderungen im Aufbau der elastischen Membran wurden verschiedene Fak-

toren verantwortlich gemacht (STAUBESAND, 1979). Einige Autoren sahen in ihnen entweder das Produkt pathologischer Prozesse (DÖRFLER, 1935) oder mindestens eine wichtige Vorbedingung für krankhafte Vorgänge (FORBUS, 1940; DAHL, 1976). Mit hoher Wahrscheinlichkeit dürften auch haemodynamische Faktoren eine Rolle spielen. Hierzu bedarf es einer Zusammenfassung der Proben zu Gruppen mit vergleichbaren Strömungsverhältnissen. Die verschiedenen Abschnitte des Circulus arteriosus cerebri können vereinfacht als gerade Gefäßabschnitte und als Verzweigungsstellen betrachtet werden. Die Proben beider Gruppen unterscheiden sich deutlich in ihrem Strömungsbild und somit in den, auf die Arterienwand einwirkenden haemodynamischen Kräfte. Deshalb wurde der Zustand der Membrana elastica interna an geraden Gefäßabschnitten (Schnittstellen 1,3,12,14) mit dem an Verzweigungsstellen (Schnittstellen 2,4,11,13) verglichen (Tab. III). Beide Gruppen unterscheiden sich deutlich. Duplikationen, Aufsplitterungen und partielle Verdickungen wurden bei Verzweigungsstellen nahezu doppelt so häufig festgestellt als bei geraden Abschnitten. Dagegen besteht in Bezug auf die Einkerbungen in der lumenwärts gerichteten Oberfläche kein Unterschied zwischen geraden Gefäßabschnitten und Verzweigungen. Die aufgezeigten Unterschiede weisen auf den Einfluss haemodynamischer Kräfte bei der Ausbildung und den späteren Abänderungen der Membrana elastica interna hin. Der entgültige Beweis eines ursächlichen Zusammenhanges wird experimentellen Arbeiten vorbehalten sein.

b.) Die elastische Grenzlamelle zwischen Tunica media und Tunica adventitia

Meist sind die Tunica media und die Adventitia miteinander verzahnt. Bei Körperarterien liegt in diesem Bereich die Membrana elastica externa, welche definitionsgemäss bei den Cerebralarterien fehlt. Diese, in den meisten Lehrbüchern vertretene Meinung muss jedoch präzisiert werden. Wenngleich sich bei keinem der Präparate eine, der Membrana elastica externa vergleichbare Verdichtung elastischer Elemente fand, so sind sie doch in dieser Grenzzone dichter angeordnet als in benachbarten Wandabschnitten.

In Anlehnung an die Einteilung von HASSLER unterscheiden wir zwischen zwei Erscheinungsformen der äusseren Grenzlamellen. Bei der ersten Form ist die Grenzzone mit wenigen, korkzieherartig gewundenen Einzelfasern markiert, welche in ihrem Aussehen und in ihrer Länge den entsprechenden Fasern in der Muskelschicht gleichen. Bei der zweiten Form ist die Grenzzone mit einer Schar dicht beieinander liegender Fasern durchsetzt (Abb. 3 und 4). Sie erinnern in einigen Extremfällen mit ihrer Anordnung an die stark aufgesplitterte Membrana elastica externa einer Körperarterie.

Zwischen den Grenzzonen unterschiedlicher Schnittstellen bestehen Abweichungen (Tab. V). Wie bereits aus der Literatur bekannt, besitzen die beiden Vertebralarterien eine, mit breiten elastischen Lamellen durchsetzte Grenzzone, die meist das Aussehen einer aufgesplitterten Membrana elastica externa hat. An der Vereinigungsstelle der Aa. vertebrales zeigt die Berührungsfläche zwischen den beiden Wandschichten die gleichen Merkmale, wenn auch in abgeschwächter Form. Erst im Bereich der A. basilaris kann nicht mehr von einer aufgesplit-

terten Membran gesprochen werden. Hier ist die äussere Grenze der Muskelschicht oft mit isolierten, spiralig gedrehten elastischen Fasern markiert.

Die beschriebene Bauweise illustrieren auch die errechneten Prozentwerte (Tab. V). Im Bereich der Vertebralarterien war die Grenzzone in 96,5% aller Fälle dicht mit elastischen Fasern durchsetzt. Ein ähnliches Bild liess sich an der benachbarten Schnittstelle 13 nur noch in 36% der untersuchten Proben darstellen. An der Bifurkation der A. basilaris sinkt der Anteil auf 7%. Die vier ausgewählten Schnittstellen aus dem Carotissystem zeigen kein vergleichbares Gefälle. Hier war der Bereich zwischen Muskelmantel und Adventitia bei keiner der untersuchten Proben besonders auffällig. Die mehrfach geäusserte Annahme, dass die äussere elastische Schicht bei den einzelnen Abschnitten des Circulus arteriosus nur geringfügig variiert, kann aufgrund des vorliegenden Materiales nicht bestätigt werden.

Dagegen können die beschriebenen Besonderheiten im Aufbau der Aa. vertebrales bestätigt werden. LANG begründet dies mit den besonderen Eintrittsverhältnissen dieser Arterie in die Schädelhöhle (LANG, 1965). Die Vertebralarterien treten in der Tat nicht direkt in den starrwandigen Schädelraum ein, sondern passieren zuerst die Membrana atlanto-occipitalis posterior und durchstossen danach den Durasack auf Höhe des Überganges des cranialen Liquorraumes in den Spinalkanal. An dieser Stelle können die arteriellen Pulsschwankungen über die Vermittlung des Liquors auf die kollagen-elastischen Wände des spinalen Durasackes übertragen werden. Dieser Umstand allein erklärt den unterschiedlichen Wandbau zwischen Vertebralis- und Carotissystem noch nicht, da die Schädelhöhle und der Spinalkanal ein kommunizierendes Liquorsy-

stem bilden. Auch die pulsatorischen Schwankungen anderer Arterien, wie etwa der beiden Karotiden, können sich, wenn auch in bescheiderem Rahmen, fortpflanzen und durch den kompressiblen Durasack des Wirbelkanales aufgefangen werden. Weiter kommt der Pulsübertragung auf venöse Abschnitte des Kreislaufsystemes und dem Einbau von Krümmungselementen in den Arterienverlauf eine kompensatorische Bedeutung zu (REYNOLD, 1948; FISCHER, 1954; LANG, 1965). Diese Ausgleichsmöglichkeiten lassen sich sowohl im Verlauf der A. vertebralis als auch der A. carotis interna nachweisen (ZOLNAI, 1964; RICKENBACHER, 1964; 1972). Im Gegensatz zur A. vertebralis ist die A. carotis interna durch einen komplexen Einbau in den s-förmig geschwungenen Canalis caroticus ausgezeichnet (TEUFEL, 1964). Die Arterie ist vom Periost durch einen bindegewebigen Verschieberaum getrennt, welcher je nach Siphonabschnitt verschieden ausgebildet, d.h. dem Krümmungsverlauf und der Steigung der A. carotis interna angepasst ist. Mit dieser Anordnung kompensatorischer Elemente im Karotiskanal wird es möglich, dass die beiden Karotiden schon beim Eintritt in die Schädelhöhle den wesentlich leichteren Aufbau einer typischen Hirnarterie zeigen, im Unterschied zur Pars intracranialis a. vertebralis.

IV. DIE SCHWACHSTELLEN IN DER TUNICA MEDIA

Meist zeigt die Tunica media das gewohnte Bild mit zirkulär angeordneten Muskelzellen. In einigen Fällen ist sie aber durch einen Bindegewebskeil eingekerbt und tritt lückenhaft in Erscheinung. Fehlen die glatten Muskelzellen vollständig, so dass das kollagene Adventitiagewebe *direkt* die Membrana elastica interna berührt, so sprechen wir von einer Mediaschwachstelle. Diese Definition schliesst, entgegen der Annahme von STEHBENS (1957), partielle Einkerbungen, bei welchen die Membrana elastica interna mit einer dünnen Schicht glatter Muskelzellen bedeckt ist, aus.

Da man in den Mediaschwachstellen eine mögliche Ursache für die Entwicklung von Aneurysmen sah, erregten sie als "Locus minoris resistentiae" das Interesse der Kliniker (FORBUS, 1930; SCHMIDT, 1930; u.a.). Diese frühen Überlegungen fanden ihre Bestätigung in den Arbeiten von VONCKEN (1931), GLYNN (1940), CARMICHAEL (1945), STEHBENS (1957) und anderen. Es liegen kaum Daten über umfangreichere Untersuchungsreihen vor, mit Ausnahme der Arbeiten von HASSLER (1961a; 1961).

a.) Der histologische Aufbau

Am Gefässquerschnitt tritt die Mediaschwachstelle als eine keilförmige Einkerbung der Muskelschicht in Erscheinung. Die Spitze des bindegewebigen Keiles, welcher den Mediadefekt ausfüllt, liegt auf der Membrana elastica interna (Abb.5). Seitlich, gegen die Muskelschicht ist der

Bindegewebskeil scharf abgetrennt, in die Adventitia geht er hingegen fließend über. Die Einkerbung wird hauptsächlich von kollagenen Fasern durchsetzt, die sich lückenlos im Gewebe der Adventitia fortsetzen. Die kollagenen Fasern sind in der Mediaschwachstelle dichter als in der Adventitia, die elastischen Fasern sind dagegen in beiden Abschnitten mit derselben Dichte vertreten. Im Gegensatz zu HASSLER (1961a) fanden wir kein eosinophiles Material in der Schwachstelle und so können wir auch die von BERLINGER (1956) postulierte infektiöse Genese des Mediaschwundes nicht stützen.

Von dem beschriebenen allgemeinem Schema wich die Struktur der Schwachstelle nur in einem Fall ab. In der Wand der A.communicans ant. bei einem $4\frac{8}{12}$ Jahre alten Knaben war der Einkerbungskeil gegen die umgebende Muskelschicht nicht stark abgegrenzt. Aus kollagenen Fasern bestand nur die äussere Hälfte des Keiles. In die innere Hälfte schoben sich Muskelfasern ein und bildeten eine in das Bindegewebe eingeschlossene Insel (Abb.6).

b.) Häufigkeit und Verteilung der Schwachstellen

Bei der Auswertung von 166 Proben des postnatalen Untersuchungsgebietes haben wir mindestens eine deutliche Einkerbung in der Tunica media in $\frac{1}{4}$ der Fälle gefunden. Dieser Befund deckt sich mit den Beobachtungen von CARMICHAEL (1945), wobei einschränkend gesagt werden muss, dass CARMICHAEL keine genauen Angaben über die Lage der Proben am Circulus arteriosus machte.

Ähnlich wie bei der Darstellung der elastischen Elemente haben wir auch bei der Schwachstelle die Verzweigungsstellen und die geraden Gefässabschnitte separat untersucht (Tab.VI). Zwischen beiden Gruppen zeigt sich ein deutlicher Unterschied. Solange bei den geraden Gefässabschnitten Einkerbungen nur in

7% der Fälle vorkommen, sind sie bei der Teilungsstelle viel häufiger. FORBUS (1930), GLYNN (1930) und STEHBENS (1957) fanden Schwachstellen bei den Bifurkationsstellen in höherem Prozentsatz als wir.

Um die Prozentuale Verteilung der Schwachstellen im Bereich des Circulus arteriosus zu lokalisieren wurden nur diejenigen Abschnitte des basalen Arterienkranzes untersucht, welche mindestens mit je 10 Proben repräsentiert waren. Wie aus der Tabelle VI hervorgeht, konnten Mediaschwachstellen weitaus am Häufigsten im Bereich der A. communicans anterior zur Darstellung gebracht werden. Dagegen sind sie an der Verzweigung der A. carotis interna in ihre Endäste um die Hälfte seltener (Schnittstelle 4). Einen ähnlichen Unterschied zeigt auch der Vergleich zwischen den Schnittstellen 11 und 13.

c.) Die Entwicklung der einzelnen Einkerbungen

Bei keiner der 136 untersuchten Proben von Embryonen und Foeten konnte eine Mediaschwachstelle zur Darstellung gebracht werden. Eine deutliche Einkerbung wurde erst bei einem 19 Tage alten Kind, am apikalen Abschnitt der Ursprungsstelle der A. carotis interna gefunden. Bei einem vier Monate alten Kind konnte ebenfalls eine schmale Einkerbung an der Verzweigung der linksseitigen A. cerebri media zur Darstellung gebracht werden; einen Befund, welcher sich mit den Beobachtungen von LAITINEN (1961) deckt. Bei älteren Kindern und Erwachsenen treten Mediaschwachstellen regelmässig in Erscheinung.

Die Entwicklung der Schwachstellen läuft bei Verzweigungsstellen und geraden Gefässabschnitten unterschiedlich ab. Bei den Verzweigungsstellen zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen den ersten beiden Altersgruppen (0 - 9¹¹/12 Jährige und 10 - 19¹¹/12 Jährige; vgl.Tab. VII), indem die Anzahl

der Einkerbung in der zweiten Gruppe verdoppelt wird. Zwischen den restlichen Gruppen sind die Schwankungen dagegen gering.

Anders verhalten sich die geraden Gefässabschnitte. Wie bereits erwähnt, sind hier Mediaschwachstellen eher selten. Innerhalb der ersten Altersstufe war lediglich einer der 23 untersuchten Gefässabschnitte eingekerbt. Ähnliches gilt auch für die weiteren Altersgruppen. Trotz des häufigen Vorkommens von Mediaschwachstellen bei Erwachsenen, können diese nicht zu den regelmässigen Merkmalen der Arterienwände gerechnet werden.

Wegen des regelmässigen und frühen Auftretens der Mediaschwachstellen an mehreren und meist konstanten Stellen des Circulus arteriosus kann es sich dabei nicht um blosse Artefakte handeln (TUTHILL, 1930; STEHBENS, 1959). HASSLER (1961) nimmt an, dass trotz fehlendem Nachweis bei Embryonen, wenigstens ein Teil der Einkerbungen einen kongenitalen Ursprung hat. Die Vorstufen der Läsionen sind seiner Meinung nach lichtmikroskopisch noch nicht darstellbar.

Wie gezeigt wurde, treten Mediaschwachstellen in erster Linie an Verzweigungsstellen in Erscheinung. Nach der Ansicht von FORBUS entstehen sie an der Trennlinie zwischen Ast und Stamm da sich die Muskelzellen in beiden Gefässwänden zu unterschiedlichen Zeiten ausdifferenzieren (FORBUS, 1928/29; 1930). Dies deckt sich auch mit unseren Beobachtungen und erklärt, weshalb sich oft Einkerbungen an der Ursprungsstelle kleinkalibriger Seitenäste fanden. An den Vereinigungs- und Verzweigungsstellen von Arterien stossen zudem zwei Muskelschichten aufeinander, deren Muskelzellen unterschiedlich orientiert sind. Bedenkt man, dass Stamm und Ast möglicherweise unterschiedlichen haemodynamischen

Belastungen ausgesetzt sind, so erscheint die Hypothese der Entstehung von Einkerbungen aufgrund früher Wandläsionen für die meisten Fälle die wahrscheinlichste Annahme zu sein.

Wirken entsprechend starke Kräfte auf den Muskelmantel ein, so kann sich auch aus einer sehr kleinen Läsion eine Mediaschwachstelle entwickeln. Dagegen kann bei der entwickelten Einkerbung weder aus dem histologischen Aufbau noch aus der Lage auf einen "locus minoris resistentiae" geschlossen werden. Die kegelförmige Einkerbung ist mit dichtgepackten kollagenen Fasern ausgestattet. Wenngleich die von GLYNN (1940) publizierten Experimente nur eine beschränkte Aussagekraft besitzen, so darf doch als sicher gelten, dass der Bindegewebskeil dem von innen angreifenden Druck des Blutes standzuhalten vermag.

Mehrere Autoren sehen in den Einkerbungen Vorstufen pathologischer Prozesse (z.B. SUZUKI and OHARA, 1979; TOOLE und PATEL, 1980). Auch wenn der Adventitiakeil die Einkerbung sicher zu verschliessen vermag, so stellt er doch einen Fremdkörper in der Media dar. Er unterbricht das fortlaufende Gefüge der Muskelschicht und weist andere physikalische Eigenschaften auf als die benachbarten Wandsektoren. In den Grenzzonen zwischen Bindegewebskeil und Muskulatur können Störungen auftreten, die Vorstufen irreversibler, pathologischer Prozesse sein können.

V. DIE INTIMAPOLSTER

a.) Histologischer Bau

Als Intimapolster werden kissen- oder zapfenartige Vorwölbungen der Intima bezeichnet. Die Bezeichnung ist deshalb irreführend, weil das Polster nicht in der Intima, sondern zwischen zwei Lamellen der Membrana elastica interna liegt. Die darüber gelegene Intima ist gleich gebaut und gleich dick wie an den übrigen Lumenabschnitten. An den Polsterrändern gabelt sich die Membrana elastica interna auf. Ihre äussere, lumenwärts gelegene Lamelle, die Lamina elastica interna (ROTTER, 1955) trennt das Polster von der Intima, die innere, die Lamina elastica limitans (WELLMER, 1952) von der Tunica media ab (Abb.7). Während die Lamina elastica interna regelmässig ein kontinuierliches und kompaktes Band bildet, ist die Lamina elastica limitans oft aufgesplittert, oder diskontinuierlich (in 11%). In den letztgenannten Fällen kommuniziert der Polsterraum mit der Tunica media. Bei älteren Individuen findet sich oft eine sklerosierte Kappe über dem Polster (Abb.8). Über pathologische Veränderungen, die nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind, orientieren die Arbeiten von WELLMER (1952) und ROTTER (1955).

Die Hauptmasse der Polster besteht aus glatten Muskelzellen, welche im Gegensatz zu den spiralgigen bzw. zirkulären Anordnung der Mediamuskulatur in der Längsrichtung verlaufen. Die einzelnen Muskelzellen sind in ein Netz von feinen elastischen Fasern eingebettet, welche, analog zu den Grenzlamellen, Abspaltungen der Membrana elastica sind. Kollagene Fasern konnten mit Sicherheit nur bei älteren Individuen nach-

gewiesen werden.

Gemäss ihrer Bauelemente, gehören alle Polsterbildungen im Bereich des Circulus arteriosus cerebri zum gemischt muskulär-elastischen Bautyp (ROTTER, 1955). Dies entspricht dem Typus 3 der Glaser'schen Einteilung (GLASER, 1950).

Nervenfasern konnten wir, ähnlich wie TAKAYANAGI (1972) weder im Polster noch in dessen näherer Umgebung finden. Die gegenteilige Auffassung von HASSLER (1961a) kann somit nicht bestätigt werden.

Die einzelnen Polster können entweder ins Arterienlumen vorspringen, oder tief in der Tunica media eingesenkt sein. Zudem kann ein und dasselbe Polster mit einem seiner Enden die Gefässlichtung einengen und mit dem andern in die Muskelschicht hineinragen. Aus diesem Grund sollten Lage und Form der Polster nur anhand von Schnittserien und nicht aufgrund von Einzelschnitten beurteilt werden. Im anatomischen Sinne dürfen die Intimapolster nicht verallgemeinert als in die Lichtung vorragende Erhebungen der Gefässwand bezeichnet werden. Wir teilen GORGAS (1975) Meinung, wonach es sinnvoller ist, wenn man sie aufgrund derjenigen Besonderheiten beschreibt, in denen sie sich von der Media unterscheiden.

Die Intimapolster variieren nicht nur in Lage, Form und histologischem Aufbau, sondern sind zudem auf vielfältige Weise in der angrenzenden Muskelschicht verankert (Tab. VIII). Den verschiedenen Verankerungsarten wurde bislang wenig Beachtung geschenkt. Mehrere Autoren weisen zwar darauf hin, untersuchen sie aber nicht systematisch (WELLMER, 1952; SERBAN, 1961; HASSLER, 1961a; u. a.).

Die Verankerung der Intimapolster zeigt zwei Haupttypen. Beim einfachen Typ (30,5%) ist das Polster in der Lamina elastica limitans verankert, resp. liegt in der Membrana elastica interna eingeschlossen (Abb.7). Bei den speziellen Typen ist die Lamina elastica limitans entweder aufgesplittert (10%) oder diskontinuierlich. In den letzten Fällen stehen die Muskelzüge des Polsters mit den gleich orientierten der Tunica media in Verbindung. Eine solche Verankerungsform wurde bei 52 von 128 Schnittstellen des postnatalen Materials gefunden. Wie die Abb. 8 zeigt, können die longitudinalen Muskelzellen in der Media einzeln, in kleinen Gruppen oder paketweise einstrahlen. In 6% der Fälle war die Muskelschicht unterhalb des Polsters verdickt und gegen die Adventitia hin ausgebuchtet. Die gegenteilige Situation, d.h. das partielle Fehlen des Muskelmantels unter dem Polster ist weitaus häufiger. Die Abb. 9a zeigt einen Schnitt durch eines der Polster an der A. communicans anterior eines 4⁸/12 jährigen Knaben, unter dem eine Mediaschwachstelle liegt. In solchen Fällen trennt die elastische Grenzlamelle das Polster nicht nur von der Media sondern über eine kurze Strecke hinweg auch vom kollagenen Gewebe der Tunica adventitia. Eine ähnliche Situation fanden wir an 22,6% der untersuchten Schnittstellen.

Von den 142 gefundenen Polstern waren 20 nur an einer Stelle mit Hilfe einer der beschriebenen Verankerungstypen befestigt. In 68 Fällen waren dagegen mehrere Verbindungsstellen verschiedenen Types vorhanden. In der Zusammensetzung der Kombinationen konnten keine Gesetzmässigkeiten festgestellt werden. Dies wird verständlich, wenn man sich die Länge eines Polsters und damit die Ausdehnung der Kontaktfläche zur

Tunica media vorstellt. Es ist durchaus möglich, dass am einen Polsterende eine durch Längsmuskelzüge verdickte Tunica media liegt, während sich in der Polstermitte eine Mediaschwachstelle befindet.

b.) Unterteilung der Intimapolster

Besser als nach ihrer Verankerungsart lassen sich die Intimapolster aufgrund ihrer Form und ihrer Lage bezüglich der Strömungsrichtung des Blutes an der jeweiligen Schnittstelle gruppieren. Nach diesen Gesichtspunkten können drei Gruppen: Sporn-, Trichter-, und seitliche Wandpolster unterschieden werden. In der Benennung der einzelnen Formen folgen wir der Beschreibung von WELLMER (1952).

Spornpolster finden sich an der Spitze (Apex) der Vereinigungsstelle der Arterien. Die Abb. 10 zeigt das WachsmodeLL der Konfluens der beiden Aa. vertebrales bei einem Foeten von 300 mm SSL, von der A. basilaris her gesehen. Die Schnittstelle ist von einem kräftigen Polster dominiert. Es ist durch einen länglichen Wulst charakterisiert, der den Apex band- oder spornförmig umgibt und sich am Boden und an der Decke der A. basilaris symmetrisch fortsetzt. An einem medianen Längsschnitt durch die Konfluens würde das Polster als ein u-förmig gekrümmtes Band in Erscheinung treten. Deshalb wird es Spornpolster genannt. Von dem apikalen Polsteranteil können nicht nur die bereits erwähnten longitudinalen Schenkel abgehen, sondern auch kürzere, seitliche, die sich entlang der medialen Wandabschnitte der Tochtergefäße

erstrecken. Diese können wie im vorliegenden Falle, sehr kurz oder aber beträchtlich lang sein. Spornpolster sind mehrheitlich durch die eingangs erwähnten Verankerungsarten mit der Tunica media verbunden. Isolierte Längsmuskelzüge zeigen mehr als die Hälfte dieser Polstergruppe. Dieser Wert ist weitaus höher als bei den übrigen zwei Formen. Dies hängt mit der bevorzugten Lage der Sporne über dem Apex der Verzweigungsstellen zusammen. Meist handelt es sich bei diesen Muskelzügen um Teile des von THOMA (1920) beschriebenen Schleifenmusters. Das gemeinsame Auftreten von Spornpolstern und Mediaschwachstellen wurde in 8 von 36 Fällen beobachtet (über die Konsequenzen aus solchen Fällen s. "Überlegungen zu Funktion und Entstehungsweise der Intimapolster").

Der Ursprung kleinkalibriger Seitenäste ist meist durch ein Trichterpolster markiert. Trichterpolster kleiden mehrheitlich die Abgangsstellen kleinkalibriger Arterien kreis- oder halbmondförmig aus. In Abb. 11 ist ein solches Polster an einem Seitenast der A. basilaris eines 4 Monate alten Kindes dargestellt. Wie dem Modell zu entnehmen ist, bedeckt der Trichter im vorliegenden Fall nicht nur die Ursprungsstelle, sondern schiebt sich beträchtlich weit in die Wand des Astes vor. Während Spornpolster oft eine Verankerung in der Tunica media besitzen, fehlt dies bei 36% der untersuchten Trichterpolster. Mediaschwachstellen kommen bei beiden Polstergruppen etwa gleich häufig vor. Longitudinal angeordnete Muskelzüge und aufgesplitterte Lamina elast. limitans stellen seltene Verankerungsformen dar.

Von den 128 gefundenen Postern bilden 20,3% sog. isolierte seitliche Wandpolster. Sie sind meist längsoval, seltener kreisrund und stehen häufig parallel zur Fliessrichtung des

Blutes. Abb.12 zeigt zwei seitliche Wandpolster bei der Bifurkation der A. basilaris in die beiden Aa. cerebri posteriores bei einem 27 jährigen Individuum (Schnittstelle 11). Die beiden Polster unterscheiden sich in ihrer Lage und Grösse. In der linken Bildhälfte ist ein wurmförmiges Seitenpolster in seiner ganzen Länge dargestellt, während auf der Gegenseite ein zweites, kleineres Wandpolster angeschnitten erscheint.

c.) Häufigkeit und Verteilung der Polstergruppen

Am postnatalen Untersuchungsgut wurden Intimapolster an 54% aller Schnittstellen gefunden. Aus haemodynamischen Überlegungen haben wir auch hier die Häufigkeit des Vorkommens an geraden Gefässabschnitten (Schnittstellen 1,3,5,8,10,12 und 14) und an Verzweigungsstellen (Schnittstellen 2,4,6,7,9,11 und 13) separat untersucht. Die beiden Gruppen unterscheiden sich deutlich voneinander. Während 86% der untersuchten Verzweigungsstellen mindestens ein Polster aufwiesen, zeigten die geraden Gefässabschnitte bloss in 22% der Fälle Polsterbildungen. Daraus ergibt sich ein Durchschnittswert von 2 Polstern pro Verzweigungsstelle gegenüber 0,2 pro geradem Gefässabschnitt.

Die Verteilung der einzelnen Polstergruppen über den Bifurkationen und geraden Gefässstrecken ist in der Tab.XI. zusammengefasst. Dass Spornpolster nur an Verzweigungsstellen zu finden sind, macht die eingangs aufgestellte Definition des Spornpolsters verständlich. Eine Fusion zwischen den longitudinalen und den seitlichen Schenkeln ist an einem geraden Gefässstück nicht möglich, da kein Apex besteht.

Der hohe Anteil an Trichterpolstern bei geraden Gefässproben bedarf einer genaueren Analyse. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Polsterform auch nur an Verzwei-

gungen vorkommt. Es handelt sich dabei meist um die Ursprungsstelle von kleinen, oft kaum sichtbaren Seitenästen wie etwa der Rami ad pontem sein könnte.

In der Abb.13 ist die durchschnittliche Anzahl der Intimapolster an ausgewählten Schnittstellen zusammengestellt. Berücksichtigt wurden bei der Auswertung, nur die Abschnitte, von denen mindestens Proben von 10 Individuen vorlagen. Das Histogramm veranschaulicht nochmals den erörterten Unterschied zwischen den Verzweigungsstellen und den geraden Proben, d.h. zwischen Abschnitten, die in unterschiedlicher Weise mit Blut durchströmt werden. Innerhalb der zweiten Gruppe (Schnittstellen 1,3,12,14) fällt der hohe Durchschnittswert für die A. basilaris auf (0,5 Polster/Schnittstelle), der mehr als doppelt so hoch ist als der für gerade Abschnitte zu erwartende Durchschnittswert. Die Erhöhung ist hauptsächlich durch die Zunahme an Trichterpolstern verursacht, was in direktem Zusammenhang zur Zahl der abgehenden Rami ad pontem a. basilaris stehen dürfte (SAEKI and RHOTON. 1972; LANG and BRUNNER. 1978)

Innerhalb der ausgewählten vier Verzweigungsstellen ist der Durchschnittswert der Polsterzahl der A. communicans anterior (Schnittstelle 2) doppelt so hoch als bei den übrigen drei Verzweigungsstellen. Dies erklärt sich einerseits aus der hohen Variationsbreite der am vorderen Abschluss des Circulus arteriosus cerebri beteiligten Arterienabschnitte und andererseits aus den in diesem Bereich herrschenden unübersichtlichen Strömungsverhältnissen. Das Zusammentreten von speziellen histologischen und haemodynamischen Verhältnissen könnte auch für die hohe Aneurysmenhäufigkeit in diesem Gebiet verantwortlich sein.

d.) Lage der Intimapolster an ausgewählten Schnittstellen

Als Grundlage für die funktionellen Überlegungen wurde die Polsteranordnung an einigen Schnittstellen genauer untersucht. Um eine gute Vergleichbarkeit zu erzielen beschränken wir uns dabei auf die Gruppe der Verzweigungsstellen.

Als erstes wurde die Verzweigungsstelle der beiden Vertebralarterien zur A. basilaris berücksichtigt, sowie deren Aufspaltung in die beiden, meist symmetrisch angelegten Aa. cerebri posteriores (Schnittstellen 11 und 13). Als Beispiel für eine Bifurkation mit Ästen unterschiedlichen Kalibers wählten wir die Übergangsstelle der A. carotis interna in ihre beiden Endäste, die A. cerebri media und die A. cerebri anterior (Schnittstelle 4).

Während die Variationsbreite bei den genannten Schnittstellen in verhältnismässig engem Bereiche bleibt, zeigt die A. communicans anterior eine beträchtliche Formenvielfalt (Schnittstelle 2). Da sich daraus vielleicht ein Hinweis auf einen Zusammenhang zwischen der starken Variabilität eines Gefässes und dessen Polsterbestückung ergeben könnte, wurde auch die Schnittstelle 2 in die Untersuchung mit einbezogen.

1.) Konfluens der beiden Vertebralarterien zur A. basilaris (Schnittstelle 13)

Die Vereinigung der beiden Vertebralarterien zur A. basilaris erfolgt in 76% der Fälle am hinteren Rand der Brücke (STOPFORD, 1916). In einer früheren, eigenen Studie (SCHMUTZ, 1975) konnte das "Idealbild", d.h. die Vereinigung zweier

symmetrischer Vertebralarterien in 45% der 60 untersuchten Arterienringe festgestellt werden. Bei ungleichen Kalibern hat meist die linksseitige Arterie einen grösseren Querschnitt. Diese Beobachtungen decken sich mit den Angaben von TESTUT (1921), KRAYENBÜHL und YASARGIL (1965) sowie von LANZ und WACHSMUTH (1979).

An dieser Verzweigungsstelle konnten alle drei Polstertypen zur Darstellung gebracht werden; Vertreten waren sie allerdings mit unterschiedlicher Häufigkeit. Am häufigsten (59%) finden sich Spornpolster, seltener Trichterpolster (37%) und nur vereinzelt isoliert stehende Wandverstärkungen (4%).

In der Abb. 14 ist die Schnittstelle 13 bei einem 4 Monate alten Kind zur Darstellung gebracht. Von der A. basilaris her betrachtet wird das Lumen der Schnittstelle von einem über dem Apex lokalisierten Spornpolster dominiert. Seine longitudinalen Schenkel reichen weit in die A. basilaris hinein und sind sowohl am Boden als auch an der Decke des Querschnittes symmetrisch angeordnet. Die lateralen Schenkel sind ebenfalls symmetrisch aber wesentlich kürzer. Sie bedecken nur einen kleinen Teil der medialen Wände der Aa. vertebrales. Diese Anordnung stellt die am Häufigsten zu beobachtende Form des Spornpolsters bei symmetrischer Anlage beider Vertebralarterien dar.

Trichter- und Seitenpolster können dagegen in ihrem Vorkommen und in ihrer Lage stark variieren. Der in Abb. 12 zur Darstellung gebrachte Modellausschnitt lässt zwei Trichterpolster erkennen, die über der Ursprungsstelle kleiner Seitenäste der A. basilaris lokalisiert sind.

Handelt es sich dagegen um einen asymmetrisch angelegten Zusammenfluss, so weicht die Polsteranordnung vom genannten Schema ab. Ein Beispiel dafür zeigt das Modell der Schnittstelle von einem 39 jährigen Individuum in Abb. 15. Die linke A. vertebralis hat ein wesentlich grösseres Kaliber als das Gefäss der Gegenseite. Die Übergangsstelle zur A. basilaris wird wiederum von einem Spornpolster dominiert. Allerdings bedeckt es den Apex nur zur Hälfte. Das Polster ist zur Seite der grosskalibrigen A. vertebralis sinistra hin verlagert und bedeckt deren medialer Rand. Die longitudinalen Schenkel sind verkürzt aber breiter angelegt als beim Zusammenfluss zweier symmetrischer Vertebralarterien. Die lateralen Schenkel sind auffallend asymmetrisch ausgebildet. Andere Polsterformen konnten im vorliegenden Fall nicht nachgewiesen werden. 5 der 10 rekonstruierten Schnittserien zeigten eine asymmetrische Ausbildung der Vertebralarterien. In all diesen Fällen konnte ein in der beschriebenen Weise angelegtes, asymmetrisches Spornpolster zur Darstellung gebracht werden.

Im allgemeinen ist bei einer symmetrisch angelegten Konfluens der Aa. vertebrales in der Regel auch das vorhandene Spornpolster symmetrisch ausgebildet. Ist die Schnittstelle dagegen asymmetrisch so sind auch die Schenkel des Spornpolsters asymmetrisch. Somit besteht ein Zusammenhang zwischen Polster- und Gefässparametern. Aus haemodynamischen Gründen kann es sich dabei aber nur um eine indirekte Beziehung zwischen dem Durchmesser der zuleitenden Vertebralarterien und der Ausbildung des Spornpolsters handeln (vgl. "Überlegungen zu Funktion und Entstehungsweise der Intimapolster").

2.) Bifurkation der A. basilaris (Schnittstelle 11)

Die aus dem Zusammenfluss der beiden Aa. vertebrales entstandene A. basilaris verläuft entlang des Sulcus basilaris nach rostral und verzweigt sich in die beiden Aa. cerebri posteriores (Schnittstelle 11). Die Bifurkation liegt entweder am Pons, am vorderen Rand der Brücke oder im Bereich der Fossa interpeduncularis (LANZ und WACHSMUTH, 1979). Sie zeigt eine kleinere Variationsbreite als die vorher besprochene Konfluens der Vertebralarterien (Schnittstelle 13). Dies gilt sowohl für Anzahl und Lumen der beteiligten Gefässe, als auch für den Winkel den die beiden Aa. cerebri posteriores miteinander einschliessen. Die Aa. cerebri posteriores sind in mehr als 80% der Fälle gleichkalibrig. Eine Kaliberzunahme kann an beiden Arterien mit derselben Häufigkeit auftreten. Diese Beobachtung deckt sich mit denen von MITTERWALLNER (1955).

Die Anordnung der Intimapolster ist bei der Bifurkation der A. basilaris uneinheitlicher als bei der Vereinigung der Vertebralarterien (Schnittstelle 13). Weiter sind die drei Polstertypen in anderen Häufigkeiten vertreten. Die sonst eher häufig auftretenden Spornpolster sind mit nur 9% an dieser Schnittstelle selten. Demgegenüber stellen die seitlichen Wandpolster mit 57% die grösste Gruppe. Trichterpolster fanden sich an den Schnittstellen 11 und 13 in etwa der gleichen Anzahl (33%). Dies wird verständlich, wenn man sich daran erinnert, dass trichterförmige Polster mehrheitlich an der Abgangsstelle kleiner Seitenäste vorkommen, deren Anzahl aber kaum von dem unterschiedlichen Aufbau der beiden Schnittstellen abhängt.

An den 10 rekonstruierten Schnittserien konnten vier unterschiedliche Polster-Verteilungsmuster festgestellt werden. Von den 8 Fällen mit gleichkalibriger Aufteilung war nur einer polsterfrei. In 4 Fällen waren longitudinale, in 3 Fällen isolierte Einzelpolster vorhanden. Spornpolster zeigten 2 Fälle bei denen sich die A. basilaris in ungleichkalibrige Äste teilte.

Bei der polsterfreien Aufteilung handelte es sich um ein 19 Tage altes Kind. In diesem Fall war lediglich die Membrana elastica interna am Übergang zur A. basilaris geringfügig aufgesplittert. Da sich bei den übrigen Fällen an dieser Stelle immer ein Intimapolster befand, kann angenommen werden, dass es sich im vorliegenden Fall um das Vorstadium eines regulären Polsters handelt.

Isolierte Einzelpolster an den lateralen Wänden der A. basilaris zeigt die Abb.16 bei einem 27 jährigen Individuum. Auf der einen Seite lässt sich das Polster über ein beträchtliches Stück hinweg an der Wand der A. cerebri posterior dextra nachweisen, während es auf der Gegenseite nur sehr klein ist. Ein weiteres kleines Einzelpolster liegt als Polsterfleck an der Abgangsstelle eines Seitenastes der A. basilaris. Eine vergleichbare Polsteranordnung konnte noch bei zwei weiteren Individuen zur Darstellung gebracht werden.

Das in Abb. 17 dargestellte Wachsmodell zeigt die Basilarisbifurkation bei einem 4 Monate alten Knaben. Vom gleichen Individuum war auch die Schnittstelle 13 rekonstruiert worden (Abb. 14). Die A. basilaris wurde in ihrem Verlauf bis hin zur Abgangsstelle der Aa. cerebelli superiores verfolgt. Anstelle eines apexüberdeckenden Spornpolsters liegen

hier zwei isolierte longitudinale Einzelpolster. Sie entspringen am oberen und unteren Rand des Apex und verlaufen an der Dekke und am Boden der A. basilaris bis zu den Abzweigungen der Aa. cerebelli superiores. Mit ihrer Lage gleichen sie den longitudinalen Schenkeln des Spornpolsters bei der Schnittstelle 13. Weiter konnten zwei Trichterpolster zur Darstellung gebracht werden, die nahe der Abgangsstelle der Aa. cerebelli superiores stehen.

Diese Posteranordnung konnte mit kleinen Abweichungen an 4 der 10 angefertigten Rekonstruktionen beobachtet werden. Diese vier Schnittstellen unterscheiden sich lediglich in Anzahl und Position der zusätzlichen Trichterpolster, sowie in den Abmessungen der longitudinalen Einzelpolster. Diese können auf das Wandstück zwischen dem Apex und den Abzweigungen der oberen Kleinhirnarterien beschränkt sein, oder reichen tiefer in die A. basilaris hinein. Darum kann die Frage, ob diese beiden Polster in erster Linie auf die Strömung an der Verzweigung der Aa. basilaris in die Aa. cerebri posteriores oder auf die der Aa. cerebelli superiores wirken aufgrund der morphologischen Analyse nicht beantwortet werden.

Spornpolster wurden in zwei Fällen mit asymmetrisch angelegten Aa. cerebri posteriores gefunden (Abb. 18). Die bei der Aufteilung der A. basilaris gelegenen Spornpolster entsprechen sowohl in ihrer Lage als auch in der Ausbildung den an der Vereinigung der Vertebralarterien gelegenen Sporne (Schnittstelle 13). An der dargestellten Aufgabelung der A. basilaris bedeckt das Polster allerdings nur einen Teil des Apex. Die longitudinalen Schenkel sind klein, die lateralen fehlen. Weiter liegen zwei kleine Polsterflecken an lateralen Wandsektoren der A. basilaris.

Trotz der gezeigten Ausnahme kann das Fehlen eines Spornpolsters, d.h. das Vorhandensein eines unbedeckten Apex als die am häufigsten auftretende Variante bezeichnet werden.

3.) Verzweigung der *A. carotis interna* in ihre Endäste (Schnittstelle 4)

Die *A. carotis interna* gibt lateral des Chiasma opticum die Pars praecommunicalis *a. cerebri anterior* ab und geht in ihren eigentlichen Endast, die *A. cerebri media* über. Bei dieser Schnittstelle 4 handelt es sich zwar um eine Bifurkation, sie gehört aber nicht wie die Schnittstellen 11 und 13 zu den symmetrischen Verzweigungsstellen. Dies lässt sich durch einen Kalibervergleich leicht zeigen. Setzt man den Durchmesser der *A. carotis interna*, kurz vor ihrem Eintritt in den Circulus arteriosus gleich 100%, so erreicht die *A. cerebri* einen durchschnittlichen Wert von 61,8%, während man für die mittlere Hirnarterie einen Wert von 79,2% erhält (nach HEILOVA und KMENTOVA-SKENSKA, 1955). Aus der Analyse von Angiogrammen ergibt sich für die *A. carotis interna* und die *A. cerebri media* ein Kaliberverhältnis von 0,74 und für die *A. cerebri anterior* und die *A. carotis interna* 0,52 (nach WOLLSCHLAEGER, 1967).

Die Aufgabelung der *A. carotis interna* gehört eher zu den variationsstabilen Abschnitten des Circulus arteriosus. In mehr als 70% der untersuchten Fälle teilen sich die *Aa. carotides internae* beidseits gleichartig in zwei Äste (*A. cerebri anterior* und *A. cerebri media*) (SCHMUTZ, 1975) und zeigen zudem die gleiche Verteilung der Intimapolster.

Die Carotisteilung zeigt eine eher gleichförmig ausgestattete Innenfläche. Den grössten Anteil der Innenstrukturen stellen die Spornpolster. Die Abgangsstelle kleiner Seitenäste ist regelmässig mit einem Trichterpolster ausgekleidet. Isolierte, longitudinale Seitenpolster kommen dagegen nur in Ausnahmefällen vor.

Die Abb. 19 zeigt die Rekonstruktion der Carotisteilung bei einem 12¹⁰/12 Jahre alten Kind. Ein grosses Spornpolster ragt weit ins Lumen der Bifurkation hinein. Einer der longitudinalen Polsterarme greift weit in die A. carotis interna hinein, der andere, etwas kürzere, geht in ein Trichterpolster über, welches die Abgangsstelle eines kleinkalibrigen Seitenastes der A. cerebri media auskleidet. Die beiden longitudinalen Arme vereinigen sich über dem Apex, wo sie auf breiter Front eine apikale Mediaschwachstelle überbrücken. Auch die kürzeren, horizontalen Polsterarme sind asymmetrisch. Im Lumen der Pars praecommunicalis der A. cerebri anterior lässt sich das Polster über eine längere Strecke hinweg nachweisen und ist auch auffallend breit. Dagegen schiebt sich der zweite Schenkel nur wenig in die A. cerebri media hinein und ist zudem schmal. Mit geringfügigen Abweichungen entsprechen neun der zehn rekonstruierten Fälle diesem Verteilungsmuster. Die Unterschiede betreffen meist nur den Ausbildungsgrad der Polsterschenkel. Ein Beispiel dafür zeigt die Verzweigung der A. carotis interna bei einem 17 jährigen Individuum (Abb. 20). Wie im vorhin beschriebenen Fall ist die Schnittstelle auch hier mit einem breiten Spornpolster ausgestattet, neben dem noch ein kleines Trichterpolster über der Abzweigungsstelle am Übergang der A. cerebri media zu sehen ist. Der an der dorsalen Gefässwand lokalisierte

longitudinale Schenkel des Spornpolsters stellt ein breit angelegtes, deutlich ins Arterienlumen vorgewölbtes Kissen dar. Das Polster überbrückt am Apex eine weite Mediaschwachstelle und geht am Boden in den zweiten, deutlich kürzeren Längswulst über. Die Fortsetzung des Spornpolsters bildet ein longitudinales Seitenpolster. Zur A. cerebri anterior hin geht ein seitlicher Schenkel ab und umfasst den Ursprung dieser Arterie halbkreisförmig. Der zweite, auf der Gegenseite lokalisierte Ausläufer ist kaum entwickelt und reicht nur wenig über die apikale Mediaschwachstelle hinaus.

4.) Die A. communicans anterior (Schnittstelle 2)

Der Circulus arteriosus cerebri wird frontal durch die A. communicans anterior abgeschlossen, welche zusammen mit den zu- und wegführenden Abschnitten der Aa. cerebri anteriores meist eine H-förmige Figur bildet. Varianten, wie Verdopplung, Rete- und Truncusbildungen sind in diesem Bereich häufig (SCHMUTZ, 1975), da die Verbindung der beiden Aa. cerebri anteriores aus einem feinmaschigen Plexus entsteht (DE VRIESE, 1907; PADGET, 1948; RICKENBACHER, 1972). Eine netzförmige A. communicans anterior gilt deshalb als ursprünglich. Schreitet die Fusion aber weiter so kann daraus eine H-förmige Verlaufsvariante entstehen. Im Extremfall führt dies gar zu einer Truncusbildung, d.h. zum Fehlen einer verbindenden A. communicans anterior.

HASSLER (1961) beschrieb das Arterienlumen als stark zerklüftet und mit Trabekeln durchsetzt.

Mit 4 Polstern pro untersuchter Probe liegt der Durchschnittswert der Polsterzahl in der A. communicans anterior deutlich über dem der anderen Schnittstellen. Nicht nur die Anzahl der Polster ist höher, sondern auch die einzelnen Typen sind mit abweichenden Häufigkeiten vertreten. Annähernd die Hälfte der Polster sind trichterförmig. 25% gehören zu den seitlichen Einzelpolster und 10,5% in die Gruppe der Spornpolster. Relativ viele Polster (18,5%) waren unregelmässig und können in keine der Gruppen eingeordnet werden.

Die Abb. 21 zeigt die Trichterformationen in der A. communicans anterior bei einem 17 jährigen Individuum im Falle eines H-förmigen Abschlusses des Circulus. Die A. communicans anterior ist an beiden ihrer Enden durch kreisförmige Trichterpolster manschettenartig abgeschlossen.

Die Abb. 22 zeigt die Polsterformen bei einer Truncusbildung. Das Gefässlumen ist mit einem einheitlichen Polsterfeld ausgestattet. Seine Ausläufer erstrecken sich ein beträchtliches Stück weit in die Partes prae- et postcom-municalis a. cerebri anterior hinein. Dabei besteht eine deutliche rechts-links-Asymmetrie. Die mit dem grösseren Kaliber versehene rechtsseitige A. cerebri anterior zeigt auch grössere Polsterausläufer. Das Polster reicht nicht nur tiefer in die Abschnitte A_1 und A_2 der A. cerebri anterior hinein, sondern ist auch tiefer in der Tunica media verankert als auf der Gegenseite. Einzelpolster konnten nicht gefunden werden.

e.) Überlegungen zur Funktion und Entstehungsweise der
Intimapolster

Mehrfach wurde die Vermutung geäußert, dass sich durch Kontraktion der longitudinalen Muskelfasern die Intimapolster mehr oder weniger in das Lumen vorbuchten und den regionalen Kreislauf dadurch regulieren (WELLMER, 1952; WAGENVOORT, 1954; ROTTER, 1955; HASSLER, 1962). Die zu der Muskelkontraktion notwendige Innervation wurde bislang im Bereich der Polster nicht in befriedigender Weise nachgewiesen (TAKAYANAGI, 1972). Nach neueren Untersuchungen gibt es durch die fenestrierte Membrana elastica interna hindurch ein Stoffaustausch zwischen Tunica media und dem Endothel (STAUBESAND, 1979). Die Frage ob dieser Stoffaustausch auch als Steuermechanismus dient, kann momentan nicht beantwortet werden. Darum beschränken wir uns auf die Analyse des passiven Einflusses der Polster auf die örtliche Strömung. In einer ersten Näherung betrachten wir die Polster, analog zu den Zusatzstrukturen im Sinus sagittalis superior, als partielle Wandverdickungen (vgl. SCHMUTZ, 1980).

Aus der morphologischen Analyse ging hervor, dass die überwiegende Mehrheit der Polster an Verzweigungsstellen liegen, d.h. an Stellen, die durch die Trennung oder Vereinigung von Teilströmen charakterisiert sind. Hier wirkt eine Vielzahl von Einflüssen auf die Strömung. Um dennoch etwas über den Einfluss der Polster aussagen zu können stellen wir zunächst zwei einfache Systeme zur Diskussion, die sich lediglich in wenigen Parametern voneinander unterscheiden. Die Schnittstellen 11 und 13 erfüllen diese Be-

dingung in befriedigender Weise. Nach metrischen Untersuchungen zu schliessen handelt es sich sowohl beim Zusammenfluss der beiden Vertebralarterien als auch beim Übergang der A. basilaris in die beiden Aa. cerebri posteriores um symmetrische Verzweigungen (HEILOVA und KMENTOVA-SULENSKA, 1955; TURNER, 1957; GABRIELSEN and GREITZ, 1970; LANG und DEHLING, 1980). Sie unterscheiden sich aber in zwei Punkten. Da es sich bei der Schnittstelle 11 um eine Konfluens und bei der Schnittstelle 13 um eine Bifurkation handelt unterscheiden sich beide in der Durchflussrichtung, was strömungstechnisch als ein wichtiges Kriterium bewertet wird (ECK, 1966). Weiter unterscheiden sich beide Schnittstellen deutlich in der Anordnung der Polster, wie ein Vergleich der Rekonstruktionen ergeben hat.

Als erstes wollen wir die Strömungsverhältnisse an der Schnittstelle 13, d.h. an einer symmetrischen Konfluens erörtern. Hier treffen zwei laminare Teilströme auf breiter Front zusammen. Deshalb ist eine Störung der Stromfäden im Apexbereich zu erwarten. Die Gefahr einer Turbulenz ist wegen der starken Durchmischung nicht auszuschliessen. Dies deckt sich mit Beobachtungen, die bei Modellversuchen gewonnen wurden (ROACH et al., 1972). Bei einer kleinen Reynoldsschen Zahl ($Re=500$) wurden dabei keinerlei Störungen festgestellt. Bei erhöhten Re -Werten hingegen konnte nicht nur eine deutliche Durchmischung, sondern auch eine Stauung im Bereich des Apex beobachtet werden.

Turbulenzen sind beim kreislaufgesunden Individuum nur im Bereich der Aorta wahrscheinlich (PEDLEY, 1980). An Abschnitten des peripheren Kreislaufes dagegen kann immer mit

einer laminaren Strömung gerechnet werden, wenngleich lokale Wandablösungen eine Rolle spielen dürften. Dies gilt somit auch für den Hirnkreislauf. Hier wurden Turbulenzen nur für den Bereich von Aneurysmen postuliert, d.h. für pathologische Zustände (SCHERER, 1973). Aus diesem Grund dürften die, an Glasmodellen dargestellten Stauungen und Tendenzen zur Wirbelbildung in vivo ausgeschlossen werden. Es ist vielmehr eine geregelte laminare Durchströmung mit möglichst geringer Durchmischung der beiden Teilströme zu erwarten. Die von ROACH und anderen verwendeten Glasmodellen unterscheiden sich von den entsprechenden Arterienverzweigungen nicht nur in der Wandbeschaffenheit, sondern auch in der Ausgestaltung der inneren Oberfläche. Wie die morphologischen Analysen ergaben, liegt meist ein Spornpolster über dem Vereinigungswinkel, Apex, der Vertebralarterien. Seiner Lage und Form entsprechend unterstützt ein solches Spornpolster die störungsfreie Separierung der beiden vertebrealen Teilströme. Dies erinnert an entsprechende Beispiele aus der technischen Strömungslehre. Sind bei der Trennung oder Vereinigung von Rohrstücken Winkel und Abzweigungsquerschnitt festgelegt, so kann der Widerstandsbeiwert durch den Einbau geeigneter Zwischenstücke, wie sie in unserem Fall die Sporn- und longitudinalen Einzelpolster darstellen, günstig beeinflusst werden (ECK, 1966).

Wie bereits erwähnt, können die ins Lumen vorspringenden Intimapolster, analog der Zusatzstrukturen im Sinus sagittalis superior, als partielle Wandverdickungen betrachtet werden. Nach der Kontinuitätsgleichung zu urteilen, resultiert aus dieser Lumenverengung eine partielle Geschwindigkeitserhöhung (SCHMUTZ, 1977). Dies könnte dem von ROACH als Stauung beobachteten Geschwindigkeitsverlust entgegenwirken und

einen störungsfreien Übertritt des Blutes in die A. basilaris gewährleisten.

Die Aufspaltung der A. basilaris in die Aa. cerebri posteriores, d.h. die Trennung in zwei Teilströme ist weniger störungsanfällig. Die zentralen Stromfäden treffen direkt auf den Apex bevor sie in die Seitenäste abgelenkt werden. Nach FERGUSON (1970) besteht darin eine wichtige Ursache für die Entstehung apikal gelegener Aneurysmen. Im Gegensatz zu den zentralen treten die lateralen Stromfäden direkt in die Seitenäste ein. ROACH et al (1972) beobachteten lokale Wandablösungen nicht am Apex, sondern im Bereich der lateralen Wandabschnitte. Dies deckt sich mit der von TEXON (1960) dargestellten Geschwindigkeitsverteilung an Bifurkationen. Es herrscht an der inneren, d.h. medialen Wand eine höhere Durchflussgeschwindigkeit als entlang der Aussenkante. Dagegen besteht eine deutliche Druckzunahme von der inneren zur äusseren Wand (STRANDNESS, 1975). Dies ist leicht einzusehen, wenn man sich die Bifurkation als ein aus zwei Krümmern (d.h. gebogenen Rohrstücken) zusammengesetztes Rohrsystem vorstellt. Aus der Existenz der beschriebenen Druck- und Geschwindigkeitsgradienten erklärt sich die Möglichkeit lateraler Wandablösungen. Dies deckt sich wiederum mit Beobachtungen an Strömungsmodellen. ROACH et al. (1972) beobachteten lokale Wandablösungen der peripheren Stromfäden im Bereich der lateralen Wand. Dieser Lage entspricht in etwa diejenige der in der Tunica media eingetieften, kleinen, isolierten Einzelpolster wie sie in Abb. 16 zur Darstellung gebracht wurden.

Wie bereits ausgeführt wurde, liegen, nahe der Schnittstelle 11 longitudinale Einzelpolster die parallel zur Strömungsrich-

tung orientiert sind. Sie können in gleicher Weise auf die Strömung einwirken wie die longitudinalen Schenkel der Spornpolster. Wahrscheinlich bewirken sie eine frühe Trennung in die beiden, für die Aa. cerebri posteriores bestimmten Teilströme.

Betrachtet man die an beiden symmetrischen Schnittstellen lokalisierten Polster, so ergibt sich der Eindruck eines zusammenhängenden, in sinnvoller Weise auf die Strömung einwirkenden Systemes. Es verhindert eine ausgedehnte Vermischung der beiden vertebrealen Teilströme und wirkt damit lokalen Wandablösungen und Wirbelbildungen entgegen. Dies deckt sich auch mit McDONALD's Beobachtungen über eine weitgehende Separierung der zwei Teilströme in der A. basilaris (McDONALD and POTTER, 1949).

Während die beiden Schnittstellen 11 und 13 zu den symmetrischen Verzweigungen gehören, teilt sich die A. carotis interna an der Schnittstellen 4 in zwei mit unterschiedlichen Kalibern ausgestattete Endäste. Hier erfolgt nicht nur die Aufteilung in zwei ungleich starke Teilströme, sondern zudem ist der Bifurkationswinkel, den die A. cerebri anterior und A. cerebri media einschliessen, deutlich grösser als zwischen den beiden A. cerebri posteriores oder Aa. vertebrales. Daraus resultiert eine Senkung des kritischen Wertes für die Reynoldsche Zahl (ROACH et al., 1972). Demzufolge überwiegen die Trägheitskräfte und es besteht eine Tendenz zur Wirbelbildung. Die Tatsache, dass das Stammgefäss und die abgehenden Äste nicht in derselben Ebene liegen, kommt als erschwerende Komponente hinzu. Wegen der erwähnten Komponenten muss man an der Schnittstelle 4 eine störungsanfällige Strömung erwarten. Das breit angelegte Spornpolster kann als möglicher Schutz vor all-

fälligen Wirbelbildungen gewertet werden. Der Sporn trennt die beiden Teilströme schon etwas vor der Einmündung in die Tochtergefäße. Wie bereits erwähnt, sind analoge Lösungen aus dem Maschinenbau bekannt. Sind dort aus Zwecksgründen die beiden Parameter Verzweigungswinkel und Abzweigquerschnitt vorgegeben, so kann der Widerstandsbeiwert wiederum durch den Einbau von spornpolsterähnlichen Zwischenstücken variiert werden.

Bislang wurden einfache Beispiele erörtert, die sich nur in wenigen Messwerten unterschieden. Denen gegenüber stellt die A. communicans anterior, zusammen mit ihren Nachbargefäßen ein komplexes, variantenreiches System dar.

Die Abb. 21 zeigt das Modell eines einfachen, H-förmigen Arterienverlaufes. Die Strömungsverhältnisse in diesem Abschnitt kann man sich folgendermassen vorstellen. Die medialen Stromfäden werden aus den Partes praecommunicalis (A_1) in die A. communicans anterior gelenkt und treffen aufeinander. Dies führt zu einem abrupten Geschwindigkeitsverlust, wenn nicht gar zur Bildung einer stehenden Blutsäule. Da ein Teil des nachströmenden Blutes auf die stehende Blutsäule stösst, sind an der Durchmischungszone Wandablösungseffekte und lokale Wirbelbildungen zu erwarten. Die lateralen Stromfäden können von der Pars prae- in die Pars postcommunicalis der A. cerebri anterior ungestört übertreten, da sie vom medialen Stauungseffekt kaum beeinflusst werden. Eine Ausnahme liegt dann vor, wenn die Pars postcommunicalis (A_2) gegenüber der Pars praecommunicalis (A_1) nach lateral abgewinkelt ist. In einem solchen Fall stellt die A. cerebri anterior ein Krümmer dar. Deshalb müsste dann mit verän-

derten Geschwindigkeits- und Druckgradienten gerechnet werden. Daher wäre dann im Bereich des lateralen Winkels, d.h. gegenüber der Mündung der A. communicans anterior, mit einer Wandablösung zu rechnen. Auch diese Überlegungen decken sich mit den Modellversuchen von ROACH et al. (1972).

Die mit Hilfe der hydrodynamischen Regeln errechnete Verteilung der örtlichen Wandablösungen deckt sich mit der Anordnung der Intimapolster an unseren Rekonstruktionen. Wie bereits erwähnt, sind diese auf die Übergangsstelle zwischen der A. communicans anterior und den Abschnitten A_1 und A_2 der A. cerebri anterior beschränkt. Das Lumen der A. communicans anterior ist weitgehend polsterfrei.

Bei einer Truncusbildung ist zwischen den beiden Strömen der Partes praecommunicales eine Durchmischung auf breiter Front zu erwarten, weil die A. communicans anterior fehlt. Da diese Strömungsverhältnisse denjenigen einer Konfluens entsprechen ist an der Berührungsfläche der medialen Stromfäden mit einer möglichen Wirbelbildung zu rechnen. Die lateralen Stromfäden verhalten sich wahrscheinlich analog wie in einem Krümmer.

Im Gegensatz zur H-förmigen Gefässanordnung, bei welcher nur einzelne Abschnitte ein Polster enthalten, ist das Lumen der Schnittstelle bei einer Truncusbildung mit einem einheitlichen Polsterfeld ausgekleidet.

Im Bereich der Schnittstelle 2 kann das Lumen zudem mit einer Reihe von Trabekeln durchsetzt sein (HASSLER, 1961). Umströmt das Blut eine solche Hindernissreihe, so ist hinter den Trabekeln eine, nach KARMAN benannte Wirbelstrasse zu er-

warten (PRANDTL, 1969). Diese Vermutung hat sich durch entsprechende Modellversuche erhärten lassen (STEBBENS, 1975).

Aus den vorgebrachten Überlegungen geht hervor, dass im Bereich des vorderen Circulusabschlusses sowohl die makroskopische Gefässanordnung als auch die Beschaffenheit des Lumens ausgedehnte Wandablösungsphänomene und gar lokale Wirbelbildungen als durchaus möglich erscheinen lassen. Eine über weite Strecken ungestörte, laminare Strömung ist erst in entfernteren Abschnitten der Pars postcommunicalis zu erwarten. Dies deckt sich in den vorliegenden Fällen mit der Anordnung der Intimapolster.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich die von uns beobachtete Lage und Verteilung der drei Polstertypen mit anhand von Glasmodellen gewonnener Darstellungen der örtlichen Strömungsverhältnisse übereinstimmt. Intimapolster treten an den Wandstellen in Erscheinung, bei welchen eine lokale Störung der laminaren Strömung zu erwarten ist.

Aus den örtlichen Strömungsstörungen resultiert eine erhöhte Belastung der Tunica intima. Mehrere Autoren haben darauf hingewiesen, dass dies biochemische Änderungen, Permeabilitätsstörungen oder gar das Absterben von Endothelzellen verursachen kann, (RODBARD, 1956; FREY, 1968; FERGUSON, 1972), was auch durch elektronenmikroskopische Untersuchungen bestätigt wurde (COPE and ROACH, 1975; BUSS, 1976, 1977). Wie aus der neueren Arterioskleroseforschung bekannt wurde, beschränken sich die beschriebenen Störungen aber nicht nur auf das Endothel, sondern führen weiter zu einer gesteigerten Proliferationsrate in der Tunica media

(ROSS and GLOMSET, 1973; Ross et al., 1974; REIDY and BOWYER, 1977).

Nachdem indirekt bewiesen wurde, dass haemodynamische Kräfte sowohl auf die Endothelauskleidung als auch auf die Mediamuskulatur wirken, drängt sich die Vermutung auf, dass die Intimapolster im Bereich der Hirnarterien reaktiv auf einwirkende haemodynamische Kräfte entstehen.

Eine andere, nicht selten geäußerte Hypothese zur Entstehung der Intimapolster geht von der Tatsache aus, dass die Muskelzellen in den Polstern longitudinal angeordnet sind. WEIBEL (1958) hat nachgewiesen, dass sich diese in den Ästen der A. bronchialis als Reaktion auf übermäßige Dehnung zurückzuführen sind. Seither sind an mehreren Stellen des peripheren Kreislaufes Orte erhöhter Zugbelastung nachgewiesen worden. Eine Übernahme dieser Ergebnisse zur Interpretation der Entstehung der Längsmuskulatur der Polster wäre inadäquat. Hierzu unterscheiden sich die intracraniellen Gefäßabschnitte zu deutlich von den peripheren Körperarterien. Weiter sind zu experimentellen Umorientierung der Muskelzellen stärkere Kräfte nötig als in vivo an der Hirnbasis wirksam werden können. Den Beweis dazu haben seine an Mesenterialarterien durchgeführten Experimente geliefert. Einem rhythmischen Zug waren diese Gefäße durch Fixation des Mesenteriums am Zwerchfell ausgesetzt. Die Schwäche der einwirkenden Kräfte wird auch nicht durch eine besonders lange Entwicklungszeit der Polster ausgeglichen, da wie die Abb. 10 zeigt, ein Spornpolster bereits bei einem Foet von 300 mm SSL zur Darstellung gebracht werden konnte.

Wir stellen uns die Intimapolster als Reaktion, der an der inneren Oberfläche angreifende haemodynamische Kräfte vor, wel-

che , wenn sie da sind, eine turbulenz- und stauungsfreie, laminare Blutströmung unterstützen, wenn nicht gar erst ermöglichen und somit einen sinnvollen Bestandteil der örtlichen Kreislaufregulierung darstellen.

VI. STICHWORTARTIGE CHARAKTERISIERUNG EINZELNER ABSCHNITTE DES CIRCULUS ARTERIOSUS

Während in den vorangegangenen Kapiteln identische Wandelemente unterschiedlicher Schnittstellen miteinander verglichen wurden, soll nun das gemeinsame Auftreten verschiedener Wandelemente an demselben Abschnitt des Arterienringes kurz charakterisiert werden. Anschliessend sollen die, an einzelnen Sektoren erhobenen Befunde einander gegenüber gestellt werden.

Aus der Beschreibung klammern wir die aus der Histologie bekannte Charakterisierung der Wandelemente aus, da diese in allen zu besprechenden Gefässabschnitten ähnlich sind. Hingewiesen wird nur auf örtliche Besonderheiten der Schichten (z.B. Intimapolster, Mediaschwachstelle usw.).

a.) Abschnitte aus dem Versorgungsgebiet der A. carotis interna

1.) Die Verzweigung der A. carotis interna in ihre Endäste (Abb. 23A)

Die Membrana elastica interna war bei den meisten Proben des postnatalen Untersuchungsgutes über den Grossteil des Querschnittes hinweg in 2-3 Lamellen geteilt oder über kurze

Strecken ganz aufgesplittert. In der Hälfte der Fälle war die Membrana partiell gequollen. Eine solche Veränderung trat häufig bei den Individuen des vierten und fünften Deceniums auf. Die lumenwärts gerichtete Oberfläche der Membrana elastica interna zeigte bei 14 der 18 untersuchten Proben starke Einkerbungen, wodurch sie ein raupenkettten- oder rosenkranzartiges Aussehen erhielt.

Die elastischen Elemente der Media sind in der Regel grobe, korkzieherartig gewundene Einzelfasern. Daneben finden sich auch vereinzelt, aus feinen Einzelfasern bestehende Netze.

Die Tunica media war in 11 der 18 untersuchten Fälle mit der angrenzenden Adventitia wellenförmig verzahnt. Die Angrenzungszone ist meist durch kurze, grobe elastische Fasern markiert.

Die elastischen Elemente der Tunica adventitia bestehen sowohl aus groben Einzelfasern als auch aus zarten Faser-netzen.

Lage und Häufigkeit von Intimapolstern und Einkerbungen im Muskelmantel (Mediaschwachstellen):

In 60% der Proben gab es mindestens eine Schwachstelle an der Karotisaufzweigung. Die Anordnung der Intimapolster wurde bereits im Kap.V besprochen. Anhand von Rekonstruktionen wurde gezeigt, dass die Schnittstelle in allen untersuchten Fällen von einem breit angelegten Spornpolster dominiert wird (Abb. 19 und 20). An jeder der untersuchten Verzweigungsstellen waren mindestens zwei Intimapolster vorhanden. Sporn- und Trichterpolster stellen davon mit je 42% den grössten Anteil dar, während die Häufigkeit der seitlichen Wand-

polster nur 16% beträgt.

2.) Die *Pars sphenoidalis a. cerebri media* (Abb. 23B)

Die Membrana elastica interna zeigte in der Hälfte der untersuchten Proben bloss geringfügige Änderungen. Grössere Aufspaltungen und partielle Verdickungen waren an 5 der 13 Proben beobachtet. Am geraden Abschnitt der *Pars sphenoidalis* erschien die *Membrana elastica interna* in allen untersuchten Fällen raupenkettenförmig, die Aufzweigung in die *Rr. insulares* (Schnittstelle 6) zeigte hingegen das gleiche Bild nur in 2/3 der Fälle. Im restlichen Drittel waren die Einkerbungen in der lumenwärts gerichteten Oberfläche der *Membrana* wenig ausgeprägt oder fehlten ganz.

An den Querschnitten durch die Schnittstelle 4, d.h. durch die Verzweigungsstelle der *Arteria carotis interna* konnten im Bereich der *Tunica media* mehrheitlich grobe, elastische Einzelfasern zur Darstellung gebracht werden. Demgegenüber bestanden die entsprechenden elastischen Elemente an der Schnittstelle 5 zu etwa gleichen Teilen aus groben Einzelfasern und feinen netzartig angeordneten. An der benachbarten Aufzweigung (Schnittstelle 6) konnten dagegen korkzieherartig gewundene Einzelfasern in vier von fünf Fällen festgestellt werden, was allerdings wegen des kleinen Untersuchungsgutes nur als Hinweis gewertet werden kann.

Die Tunica media war mit der Adventitia in allen Fällen wellenförmig verzahnt. Diese Grenzzone war entweder durchgehend oder nur partiell mit elastischen Fasern unterschiedlicher Grössenordnung durchzogen.

Im Bereich der Tunica adventitia konnten sowohl grobe als auch feine elastische Fasern unterschieden werden, wobei in 9 von 13 Fällen die Anzahl der groben Fasern überwog.

Am Stammabschnitt der A. cerebri media fanden sich keinerlei Einkerbungen in der Tunica media. Demgegenüber zeigte die benachbarte Bifurkation in drei von fünf Fällen deutliche, d.h. bis auf die Membrana elastica interna reichende Media-schwachstellen. Im Lumen des Arterienstammes konnten bei vier der fünf Proben Intimapolster nachgewiesen werden. Drei davon waren an der Abgangsstelle kleinkalibriger Seitenäste lokalisierte Trichterpolster, beim vierten handelte es sich um ein isoliertes Seitenpolster. Die Schnittstelle 6 wies an fünf Proben sieben Polster auf. Davon gehörten drei zu den Spornpolstern, ebensoviele zu den Trichterpolstern und eines zu den isolierten Seitenpolstern.

3.) Die Partes prae- et postcommunicalis a. cerebri anterior (Abb. 23C)

Die baulichen Unterschiede zwischen den Partes prae- et postcommunicalis a. cerebri anterior (A_1 und A_2) sind gering.

Die Membrana elastica interna zeigt in der Pars postcommunicalis doppelt so häufig partielle Duplicationen als in der Pars praecommunicalis. Partielle Quellungen fanden sich an der Pars praecommunicalis (A_1) in 1/3 der Fälle, am Abschnitt A_2 nur in 1/4 der Proben. Beide Abschnitte zeigen in etwa 50% der Proben Aufsplitterungen in mehrere dünne Einzellamellen.

Grössere Unterschiede bestehen in der Dichte und Anordnung der elastischen Elemente in der Media an beiden Abschnitten der vorderen Hirnarterie. Im Bereich der Pars praecommunicalis überwiegen mit 60% die groben Einzelfasern. Ein Netz aus feinen Fasern war in etwa 10% der Fälle vorhanden, während bei den restlichen Proben grobe Einzelfasern in ein Netz aus feinen Fasern eingebettet waren. Demgegenüber war die Tunica media der Pars postcommunicalis in der Hälfte aller untersuchten Proben mit einem feinen Fasernetz durchzogen. In der anderen Hälfte der Fälle waren die groben Einzelfasern in ein feines Fasernetz eingebettet.

In der Ausgestaltung der Grenzzone zwischen der Tunica media und der Tunica adventitia unterscheiden sich die beiden Abschnitte A_1 und A_2 nur gering. Im Bereich der Pars praecommunicalis konnten einzelne Faserzüge in $3/4$ der Fälle an mehreren Stellen des Querschnittes nachgewiesen werden, bei der Pars postcommunicalis war dies in $2/3$ der Fälle möglich.

Intimapolster und Einkerbungen sind an beiden Abschnitten gleichermassen selten. Im Bereich der Pars praecommunicalis konnten bei 14 untersuchten Proben insgesamt nur drei Trichterpolster gefunden werden, im Bereich der Pars postcommunicalis waren es lediglich zwei. Letztere konnten systematisch nicht eingestuft werden, da sie an der Schnittserie nicht in ihrer ganzen Länge verfolgt werden konnten. An der Schnittstelle 3 gab es nur eine Mediaeinkerbung, während der Muskelmantel im Bereich der Schnittstelle 1 keinerlei Veränderungen aufwies.

4.) Die *A. communicans anterior* (Abb. 23D)

Die komplexe Histogenese und die erhöhte haemodynamische Belastung dieses Abschnittes des Circulus arteriosus widerspiegeln sich sowohl im histologischen Aufbau der Arterienwand als auch in der Ausgestaltung seines Lumens.

Die Membrana elastica interna stellte nur in einer der 14 Proben ein kompaktes und kontinuierliches Band dar. Knapp in der Hälfte der Proben traten partielle Membranverdoppelungen auf. Aufsplitterungen in mehrere Einzellamellen zeigten eine Häufigkeit von 90% und können somit als charakteristisches Erscheinungsbild der Membrana elastica interna dieses Gefäßabschnittes gewertet werden.

Die Tunica media enthält grobe, elastische Einzelfasern und feine Fasernetze zu gleichen Teilen.

Einkerbungen der Media wurden an 11 der 14 untersuchten Proben zur Darstellung gebracht. Durchschnittlich wurden 3,5 Intimapolster pro Fall festgestellt. Anstelle von abgegrenzten Einzelpolstern ist oft nur ein ausgedehntes Polsterfeld zu finden. Von den 50 festgestellten Polstern konnten nur 35 systematisiert werden. Hierbei stellen die 21 isolierten Einzelpolster den grössten Anteil dar, gefolgt von 12 isolierten Einzelpolstern. Demgegenüber wurden nur zwei Spornpolster gefunden.

5.) Die *A. communicans posterior* (Abb. 23E)

Anfänglich stellt die *A. communicans posterior* den kaudalen Ast der primitiven *A. carotis interna* dar. Bis zur endgültigen Ausbildung der *A. vertebralis* ist sie ein dickes Gefäß, durch welches die Arterien des Hinterhirns Blut aus der *A. carotis interna* erhalten. Ihr kaudaler Abschnitt (*Pars basilaris*) stellt den Anfangsteil der definitiven *A. cerebri posterior* dar. Infolge der starken Grössenzunahme der Hemisphären wird der periphere Abschnitt dieses Gefäßes allmählich stärker und erhält durch seine *Pars basilaris* Blut aus der Vertebralarterie. Parallel zu dieser Entwicklung erfährt der vordere Abschnitt (*Pars carotica*) der ursprünglichen *A. communicans posterior* eine Abnahme des Kalibers und wird zum definitiven Gefäß gleichen Namens. Längen- und Kalibervarianten dieser Arterie sind sehr häufig (SCHMUTZ, 1975).

Von der *A. communicans anterior* wurden jeweils an drei Stellen beim Ursprung, bei der Mündung und bei der Gefäßmitte Proben entnommen (Schnittstellen 7,8 und 9). Die ersten zwei Schnittstellen entsprechen einer Bifurkation, die dritte stellt eine gerade Gefäßstrecke dar.

Die Membrana elastica interna zeigte eine partielle Duplikation bei 9 der 18 untersuchten Fälle und Aufsplitterungen in 8 Fällen. Wie an anderen Stellen des basalen Arterienringes war auch hier die lumenwärts gerichtete Membranoberfläche in 14 von 18 Fällen stark eingekerbt. Deutlich ist der Unterschied zwischen den beiden Bifurkationen (Ursprung und Mündung, Schnittstellen 7 und 9) und dem unverzweigten Segment (Schnittstelle 8). Verzweigungsstellen zeigen um

20% häufiger Quellungen und Aufsplitterungen der elastischen Membran.

Dagegen zeigen die elastischen Elemente in der Tunica media an allen drei Schnittstellen nur geringfügige Unterschiede. Bei der Hälfte aller Proben waren isolierte, korkzieherartig gewundene Einzelfasern die Regel, während zarte Fasernetze die Ausnahme sind.

Die Grenzzone zwischen der Tunica media und Adventitia ist, im Vergleich zu den Bifurkationen und geraden Gefäßstücken anderer Circulusabschnitte weniger deutlich mit elastischen Lamellen durchsetzt.

Die Dichte der elastischen Fasern zwischen dem kollagenen Gewebe der Adventitia ist ebenfalls geringer als bei der A. carotis interna bzw. der Schnittstelle 4.

Die Anordnung der Intinapolster an den drei Schnittstellen widerspiegelt die in Kapitel V dargestellten grundsätzlichen Unterschiede zwischen verzweigten und unverzweigten Arterienabschnitten.

Eine deutliche Einkerbung in der Tunica media zeigten nur drei der 18 untersuchten Proben. Alle drei Mediadefekte waren an Verzweigungsstellen lokalisiert. Schlüsse können daraus wegen des beschränkten Untersuchungsgutes (n=18) nicht gezogen werden.

b.) Abschnitte aus dem Versorgungsgebiet der A. vertebralis

1.) Die A. vertebralis (Abb. 23F)

Wie bereits dargelegt wurde, unterscheidet sich die A. vertebralis im Aufbau ihres intrakraniellen Abschnittes deutlich von den übrigen Anteilen des basalen Arteriensystemes. Das gehäufte Auftreten elastischer Elemente fiel an beiden untersuchten Schnittstellen auf (Schnittstelle 13 und 14). Dies trifft in besonderem Masse für die elastischen Fasern an der Grenze zwischen Tunica media und Adventitia zu. An der Schnittstelle 14 zeigten 40% aller Proben eine dicht mit Fasern durchsetzte Grenzzone. Dieses Bild erinnert an die aufgesplitterte Membrana elastica externa einer Körperarterie. In den restlichen Fällen konnten Einzellamellen zur Darstellung gebracht werden, die über den ganzen Querschnitt verteilt, die Grenze zwischen den beiden äusseren Wandschichten markieren. Dies liess sich in etwas abgeschwächter Form auch am benachbarten Zusammenfluss der beiden Vertebralarterien nachweisen (Schnittstelle 13).

Demgegenüber unterscheidet sich die Membrana elastica interna an beiden Schnittstellen kaum von den übrigen Abschnitten des Vertebralis-Systemes. Sie war in etwa 60% der Fälle aufgesplittert. Dagegen ist der Anteil an partiell verdickten Membranabschnitten mit 10-20% eher klein.

Wie aufgrund der Vergleiche zwischen geraden und unverzweigten Abschnitten zu erwarten war, unterscheiden sich die beiden, an der A. vertebralis definierten Schnittstellen in Lage und Anzahl der Intimapolster und der Einkerbungen in der Tunica media.

Im Bereich des Arterienlumens konnten lediglich sechs Polster dargestellt werden. Dies ergibt einen Durchschnittswert von 0,5 Polster pro Schnittstelle. Davon lagen fünf als Trichterpolster über der Abgangsstelle kleiner Seitenäste, das sechste konnte nicht mit Sicherheit qualifiziert werden. Schwachstellen in der Tunica media sind im vorliegenden Abschnitt des Circulus arteriosus selten. Lediglich eine, bis auf die Membrana elastica interna reichende Einkerbung wurde gefunden. Am Zusammenfluss beider Aa. vertebrales konnten 20 Polster zur Darstellung gebracht werden, was einer Häufigkeit von 1,5 Polster pro Schnittstelle entspricht. Davon traten 11 als Gefässsporne in Erscheinung, acht waren trichterförmig und zwei gehörten zu den isolierten Einzelpolstern. Meist wird die Schnittstelle von einem breiten Spornpolster dominiert. Mediaschwachstellen bei der Konfluens der Vertebralarterien konnten an fünf der insgesamt 16 untersuchten Proben festgestellt werden.

2.) Die A. basilaris (Abb. 23G)

Die an den Vertebralarterien zu beobachtenden Charakteristica liessen sich in abgeschwächter Form auch an der A. basilaris nachweisen.

Die Membrana elastica interna wies in der Hälfte des Untersuchungsgutes Aufsplitterungen auf. Dagegen sind partielle Duplikationen mit einem Anteil von nur 13% eher selten. "Rosenkranzähnliche" Membranae elasticae internae konnten mit einer einzigen Ausnahme bei allen untersuchten Proben beobachtet werden.

Die Grenzzone zwischen Tunica media und Tunica adventitia war lediglich in 8% der Fälle dicht mit elastischen Fasern durchsetzt. Bei 42% der Proben war die Grenze durch isolierte Einzellamellen markiert. Im Aufbau der Muskelschicht und der Tunica adventitia konnten keine Besonderheiten festgestellt werden.

Einkerbungen in der Tunica media sind eher selten. Eine solche wurde lediglich in zwei Fällen bei der Abgangsstelle kleinerkalibriger Arterienäste gefunden.

An 15 untersuchten Arteriensegmenten wurden insgesamt 10 Intimapolster unterschieden. Davon lagen fünf als Trichterpolster über Abgangsstellen kleiner Seitenäste und zwei traten als isolierte Einzelpolster in Erscheinung. Die restlichen Elemente konnten nicht eindeutig qualifiziert werden, da die untersuchten Schnitte nur Polsterbruchstücke enthielten.

3.) Die A. cerebri posterior (Abb. 23H)

Die A. cerebri posterior unterscheidet sich von den Schnittstellen 11 bis 14 durch das Fehlen einer deutlich mit elastischen Fasern markierten Grenzzone zwischen Tunica media und Tunica adventitia. In dieser Zone waren lediglich wenige Einzelfasern vorhanden.

Die Membrana elastica interna zeigte in zwei der fünf untersuchten Fällen Duplikationen, partielle Verdickungen und Quellungen. Die elastischen Elemente in der Tunica media bestanden

zu gleichen Teilen aus isolierten Einzelfasern und feinmaschigen Fasernetzen. Dies gilt auch für die elastischen Elemente in der Tunica adventitia.

c.) Zusammenfassende Interpretation der Einzelbefunde

Aufgrund der unterschiedlichen Blutzufuhr teilen wir die untersuchten Abschnitte des Circulus arteriosus in zwei Gruppen. Die zum Vertebralissystem gehörenden Abschnitte werden den zum Carotissystem gehörenden Schnittstellen gegenübergestellt. Deutliche quantitative Unterschiede zwischen beiden Gruppen bestehen im Aufbau der elastischen Grenzlamellen zwischen Tunica media und Tunica adventitia.

Im Bereich des intracraniellen Abschnittes der A. vertebralis entsprechen sie der Membrana elastica externa der Körperarterien. Eine membranartige Verdickung der elastischen Elemente wird an der A. basilaris und deren Aufzweigung in die Aa. cerebri posteriores nur selten beobachtet. Die weiteren Schnittstellen dagegen zeigen einheitlich eine wenig markierte Grenzzone.

Ordnet man die einzelnen Gefäßabschnitte nicht nach ihrer Lage am basalen Arterienring und nicht nach der jeweiligen Blutzufuhr, sondern aufgrund ihrer haemodynamischen Belastung, so drängt sich eine Trennung der unverzweigten von den verzweigten Schnittstellen auf. Die so gebildeten Gruppen unterscheiden sich deutlich in der Lage und Anzahl der Einkerbungen und Intimapolster. Wie schon im Kapitel IV gezeigt wurde, treten Einkerbungen in der Tunica media (Schwachstellen) an geraden Abschnitten nur selten auf,

während sie bei Verzweigungsstellen in der Hälfte aller Proben anzutreffen sind. Ebenso deutlich sind die Ergebnisse für die Intimapolster. Wie im Abschnitt "Häufigkeit und Verteilung der drei Polstergruppen" (Kapitel V) dargestellt wurde, lassen sich Intimapolster im Bereich von Bifurkationen und Konfluenzen in 86% der Proben nachweisen, an geraden, unverzweigten Arteriensegmenten dagegen nur in 22% der Fälle.

VII. ZUSAMMENFASSUNG

Das Ziel der vorliegenden Studie war festzustellen, inwieweit die einzelnen Abschnitte des Circulus arteriosus cerebri in ihrem histologischen Aufbau sich voneinander unterscheiden.

Zur Untersuchung gelangten Schnittserien von 336 Abschnitten des basalen Arterienringes, die von insgesamt 44 Individuen unterschiedlichen Alters stammten. Nebst acht Embryonen und Foeten wurden Hirngefäße von Kindern und Erwachsenen berücksichtigt, deren Altersspektrum von neun Tagen bis 60 Jahren reichte. Alle Proben wurden in Serien geschnitten und alternierend mit Haematoxilin-Eosin und Resorcin-Van Gieson gefärbt. Von 40, zu lückenlosen Serien aufgearbeiteten Proben wurden graphische Rekonstruktionen angefertigt. Zudem wurden 11 Wachsmodelle hergestellt.

Die Untersuchungen führten zu den folgenden Ergebnissen: Die einzelnen Abschnitte des basalen Arterienringes unterscheiden sich: im Aufbau der elastischen Elemente, in der Verteilung der Einkerbungen in der Tunica media und im Auftreten der Intimapolster. Die Unterschiede zeigen sich sowohl zwischen den Anteilen des Vertebralis- und Carotis-systemes als auch zwischen verzweigten und unverzweigten Abschnitten.

Die zum Vertebralisssystem gehörenden Abschnitte zeichnen sich durch eine sehr stark mit elastischen Fasern durchsetzten Grenzzone zwischen der Tunica media und der Tunica adventitia aus. Dies erklärt sich aus der unterschiedlichen

Eintrittsart der A. vertebralis und der A. carotis interna in die Schädelhöhle.

An der Membrana elastica interna treten bei Verzweigungsstellen oft Veränderungen auf. Sie erscheinen an diesen Stellen foetal wesentlich früher auf als bei unverzweigten Abschnitten.

Verzweigungen und gerade Gefässstrecken unterscheiden sich nicht nur in der Beschaffenheit der Membrana elastica interna, sondern auch im Auftreten der Schwachstellen in der Tunica media. Solche sog. Mediaschwachstellen konnten nahezu bei der Hälfte aller untersuchten Verzweigungsstellen nachgewiesen werden, während sie an geraden Gefässabschnitten nur in 7% gefunden wurden. Daraus folgen wir, dass die haemodynamischen Kräfte, die auf die Arterienwand einwirken, für das Entstehen der Schwachstellen massgebend sind. Sie stellen aber, wie ihr histologischer Aufbau zeigt, keinen "locus minoris resistentiae" dar.

Die Intimapolster konnten aufgrund ihres histologischen Aufbaues nach ihrer Form und Lage bezüglich der Strömungsrichtung des Blutes an der jeweiligen Schnittstelle in drei Gruppen gegliedert werden. Es wurden Sporn-, Trichter- und isolierte Einzelpolster unterschieden, sowie deren Häufigkeiten festgestellt. Die Anordnung der Polster an ausgewählten Schnittstellen wurden anhand von zeichnerischen und plastischen Rekonstruktionen ermittelt. Ein über der Konfluensspitze, dem Apex, gelegenes Spornpolster am Zusammenfluss der beiden Aa. vertebrales konnte dabei schon bei einem Foeten von 300mm SSL nachgewiesen werden. Dieser Konfluens ist auch bei Erwachsenen meist mit einem Spornpolster ausgestattet, das je nach dem Verhältnis zwischen Kalibern der zuleitenden Vertebralarterien symmetrisch oder asymmetrisch aufgebaut

ist. Bei der darauffolgenden Bifurkation der A. basilaris, d.h. an einer vergleichbaren Verzweigungsstelle mit umgekehrter Strömungsrichtung, fehlt das apikale Spornpolster. An dieser Stelle sind dagegen parallel zur Flussrichtung des Blutes in der A. basilaris orientierte, isolierte Einzelpolster die Regel. Die Verzweigung der A. carotis interna in ihre Endäste zeigt, als Beispiel einer asymmetrischen Bifurkation, ein breit angelegtes, mit asymmetrischen Schenkeln versehenes Spornpolster. Die A. communicans anterior stellt eine Arterie mit einer grossen Variationsbreite und komplexen Strömungsverhältnissen dar. Bei der einfachen, H-förmigen Anordnung dieses Gefässes sind lediglich die Ursprungs- und Mündungsstellen mit Trichterpolster versehen. Dagegen konnten bei der Truncusbildung zwischen beiden Aa. cerebri anteriores, d.h. dem Fehlen einer eigentlichen A. communicans anterior, keine isolierten Polster festgestellt werden. Das Arterienlumen war vielmehr mit einem zusammenhängenden Polsterfeld ausgekleidet. Die funktionsmorphologische Analyse der beschriebenen Fälle, unter Berücksichtigung bekannter Modellversuche, hat gezeigt, dass Intimapolster bevorzugt an den Wandstellen in Erscheinung treten, bei welchen eine lokale Störung der laminaren Strömung zu erwarten ist. Es liegt die Vermutung nahe, dass sie Polster reaktiv auf haemodynamische, an der inneren Arterienoberfläche angreifende Kräfte entstehen und dazu beitragen, dass im Circulus arteriosus cerebri laminare Strömungsverhältnisse herrschen.

VIII. DANK

Meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Prof. St. Kubik (Abteilung für Makroskopie des Anatomischen Institutes der Universität Zürich) möchte ich herzlich für die jederzeit gewährte Hilfe und Unterstützung danken.

Herr Prof. J. Biegert (Anthropologisches Institut der Universität Zürich) erlaubte in grosszügiger Weise, dass die vorliegende Studie an der Medizinischen Fakultät geschrieben werden konnte.

Ein Grossteil des Untersuchungsgutes stammte aus der Abteilung für Neuropathologie des Institutes für Pathologie der Universität Zürich (Prof. R.L. Friede) und aus dem Gerichtlich-Medizinischen Institut (Prof. H. Hartmann).

Eine erste Durchsicht des Manuskriptes besorgte mein Kommilitone P. Schmid. Für die technische Unterstützung danke ich Frl. M. Müller, Frau H. Weber und Herrn A. Lang.

IX. LITERATUR

- AHMED, M. M.: Microscopic anatomy and the attenuation of elastic tissue in the aortic wall of Slow Loris. *Folia primatol.* 8: 290-300 (1968).
- ALBERT, E. N.: Developing elastic tissue - An electron microscopic study. *Am. J. Pathol.* 69: 89-102 (1972).
- ALLSOPP, G.; GAMBLE, H. J.: Light and electron microscopic observations on the development of the blood vascular system of the human brain. *J. Anat., Lond.* 128: 461-477 (1979).
- BENNINGHOFF, A.: Blutgefäße und Herz; in MÖLLENDORFF Handbuch der mikroskopischen Anatomie des Menschen, vol. VI/1, pp. 1-232 (Springer, Berlin 1930).
- BERBLINGER, W.: Die Aneurysmen der basalen Hirnarterien und ihre infektiöse Genese. *Beitr. path. Anat.* 116: 39-60 (1956).
- BOQUIST, L.; HASSLER, O.: Mediadefects in arteries, An ultrastructural study on normal and hypertensive rabbits. *Pathol. Eur.* 7: 23-28 (1972).
- BUNCE, D. F. M.: Atlas of arterial histology (Warren Green, St. Louis 1974).
- BURTON, A. C.: Relation of structure to function of the tissues of the wall of blood vessels. *Physiol. Rev.* 34: 619-641 (1954).
- BUSBY, D. E.; BURTON, A. C.: The effect of age on the elasticity of the major brain arteries. *Canad. J. Physiol. Pharmacol.* 43: 185-202 (1965).
- BUSS, H.; HOLLWEG, H. G.: Scanning electron microscopy of blood vessels: A review. *Proc. Workshop Biomed. Applic.* vol. 2, pp. 467-475 (IIT Research Institute, Chicago 1977).
- BUSS, H.; KLOSE, J. P.; HOLLWEG, H. G.: Endothelial surface of renal, coronary, and cerebral arteries. *Proc. Workshop Biomed. Applic. SEM* vol. 5, pp. 217-224 (IIT Research Institute, Chicago 1976).
- CANHAM, P. B.: Orientation of cerebral vascular smooth muscle, mathematically modelled. *J. Biomech.* 10: 241-251 (1977).
- CARMICHAEL, R.: Gross defects in the muscular and elastic coats of the larger cerebral arteries. *J. Pathol. Bact.* 57: 344-351 (1945).
- CONTI, G.: Über das Vorkommen von Sperrvorrichtungen in Arterien mit spezieller Berücksichtigung der "gestielten Polster". *Acta anat.* 18: 234-255 (1953).
- COPE, D. A.; ROACH, M. R.: A scanning electron microscopic study of human cerebral arteries. *Canad. J. Physiol. Pharmacol.* 53: 651-659 (1975).

- DAHL, E.: The innervation of the cerebral arteries. *J. Anat., Lond.* 115: 53-63 (1973).
- DAHL, E.: Microscopic observations on cerebral arteries; in CERVOS-NAVARRO The cerebral vessel wall, pp. 15-21 (Raven press, New York 1976a).
- DAHL, E.: Electron microscopic observations on human intracranial arteries: Changes seen with aging and atherosclerosis; in CERVOS-NAVARRO The cerebral vessel wall, pp. 61-66 (Raven press, New York 1976b).
- DÖRFLER, J.: Ein Beitrag zur Frage der Lokalisation der Arteriosklerose der Gehirngefäße mit besonderer Berücksichtigung der Arteria carotis interna. *Arch. Psychiat. Nervenkr.* 103: 180-190 (1935).
- EBHARDT, G.; WÜLLENWEBER, R.; CERVOS-NAVARRO, J.: The ultrastructure of the aneurysmatic vessel wall; in CERVOS-NAVARRO The cerebral vessel wall, pp. 67-74 (Raven press, New York 1976).
- ECK, B.: Technische Strömungslehre; 7. Aufl. (Springer, Berlin 1966).
- FERGUSON, G. G.: Turbulence in human intracranial saccular aneurysms. *J. Neurosurg.* 33: 485-496 (1970).
- FERGUSON, G. G.; ROACH, M. R.: Flow conditions at bifurcations as determined in glass models with reference to the focal distribution of vascular lesions; in BERGEL Cardiovascular fluid dynamics, vol. 2, pp. 141-156 (Academic press, London 1972).
- FERNER, H.; KAUTZKY, R.: Angewandte Anatomie des Gehirns und seiner Hüllen; in OLIVECRONA und TÖNNIS Handbuch der Neurochirurgie, vol. 1/1, pp. 1-90 (Springer, Berlin 1959).
- FIRBAS, W.; SINZINGER, H.: Über den Anfangsteil der Arteria cerebri anterior. *Acta anat.* 83: 81-86 (1972).
- FISCHER, H.: Verlauf und Form der Hirnarterien und ihre funktionelle Bedeutung. *Anat. Anz. Erg. Bd.* 100: 355-361 (1954).
- FISCHER, H.: Die Beanspruchung durch den hydrostatischen Druck und morphologische Besonderheiten der Wand bei gekrümmten Arterien. *Anat. Anz. Erg. Bd.* 112: 384-390 (1963).
- FISCHER, H.: Die Struktur der Arterienwand mit besonderer Berücksichtigung der Einwirkung des hydrostatischen Druckes. *Angiologica, Basel* 2: 285-313 (1965).
- FISCHER-DZOGA, K.; CHEN, R.; WISSLER, R.: Effects of serum lipoproteins on the morphology, growth and metabolism of arterial smooth muscle cells; in WAGNER and CLARKSON Arterial mesenchyme and arterosclerosis, pp. 299-311 (Plenum press, New York 1974).
- FORBUS, W. D.: Über den Ursprung gewisser Aneurysmen der basalen Hirnarterien. *Zbl. allg. Pathol. pathol. Anat.* 44: 243-245 (1928/29).
- FORBUS, W. D.: On the origin of miliary aneurysms of the superficial cerebral arteries. *Bull. Johns Hopk. Hosp.* 47: 239-

- 284 (1930).
- FOURMAN, J.; MOFFAT, D.B.: The effect of intra-arterial cushions on plasma skimming in small arteries. *J. Physiol., Lond.* 158: 374-380 (1961).
- FRY, D. L.: Acute vascular endothelial changes associated with increased blood velocity gradients. *Circulat. Res.* 22: 165-197 (1968).
- GABRIELSEN, T.O.; GREITZ, T.: Normal size of the internal carotid, middle cerebral and anterior cerebral arteries. *Acta radiol., Stockh.* 10: 1-10 (1970).
- GLASER, J.: Über die Polsterarterien der menschlichen Niere; med. Diss. Kiel (1950).
- GLYNN, L.E.: Medial defects in the circle of willis and their relation to aneurysm formation. *J. Pathol. Bact.* 51: 213-222 (1940).
- GOERTTLER, K.: Die funktionelle Bedeutung des Baues der Gefäßwand. *Dtsch. Z. Nervenheilk.* 170: 433-445 (1953).
- GORGAS, K.; BÖCK, P.: Studies on intra-arterial cushions. I. Morphology of the cushions at the origins of intracostal arteries in mice. *Anat. Embryol.* 148: 59-72 (1975).
- GRISOLI, J.: L'artère cérébrale communicante antérieure. *C. R. Ass. Anat.* 99: 349-355 (1957).
- HALE, A. R.: Circle of Willis. Functional concepts, old and new. *Am. Heart J.* 60: 491-494 (1960).
- HASHIMOTO, N.; HANDA, H.; HAZAMA, F.: Experimentally induced cerebral aneurysms in rats. *Surg. Neurol.* 10: 3-8 (1978).
- HASSLER, O.: Morphological studies on the large cerebral arteries. *Acta psychiat. scand. (suppl. 154)* 36: 1-145 (1961 a).
- HASSLER, O.: The adventitia of the cerebral arteries. Differences between newborns and adults. *Confin. neurol.* 21: 473-477 (1961b).
- HASSLER, O.: Elastic tissue contents of the medial layer of the cerebral arteries. Differences between young and adult individuals. *Virchows Arch. pathol. Anat.* 335: 39-42 (1962a).
- HASSLER, O.: The windows of the internal elastic lamella of the cerebral arteries. *Virchows Arch. pathol. Anat.* 335: 127-132 (1962b).
- HASSLER, O.: A systematic investigation of the physiological intima cushions associated with the arteries in five human brains. *Acta soc. med. Upsal.* 67: 35-41 (1962c).
- HASSLER, O.: Physiological intima cushions in the large cerebral arteries of young individuals. *Acta pathol. microbiol. scand.* 55: 19-27; 28-30 (1962d).
- HASSLER, O.: Physiological intima cushions of the large cerebral arteries. *Acta pathol. microbiol. scand.* 55: 31-34 (1962e).
- HASSLER, O.: Media defects in human arteries. *Angiology, Baltimore* 14: 368-371 (1963).
- HASSLER, O.: Scanning electron microscopy of saccular intracranial aneurysms. *Am. J. Pathol.* 68: 511-520 (1972).
- HASSLER, O.; LARSSON, S. E.: The external elastic layer of the cerebral arteries in different age-groups. *Acta anat.* 48: 1-6 (1962).

- HEILOVA, Z.; KMENTOVA-SKLENSKA, A.: zit. nach BLINKOV, S. M.; GLEZER, I. I.: Das Zentralnervensystem in Zahlen und Tabellen, p. 234 (Fischer, Jena 1968).
- HIERONYMI, G.: Über den altersbedingten Formwandel elastischer und muskulärer Arterien. Sitzber. Heidelb. Akad. Wiss. Math.-natwiss. Kl. 3. Abh. (Springer, Heidelberg 1956).
- HIMWICH, W. A.; CLARK, M. E.: Model studies of the circle of willis: Flow and pressure changes. Progr. Brain Res., vol. 30, pp. 135-143 (Elsevier, Amsterdam 1968).
- ITO, J.; MAEDA, H.; INOUE, K.; ONISHI, Y.: Fenestration of the middle cerebral artery. Neuroradiology 13: 37-39 (1977).
- KLASSEN, A. C.; SUNG, J. H.; STADLAN, E.: Histological changes in cerebral arteries with increasing age. J. Neuropathol. exp. Neurol. 27: 607-623 (1968).
- KRAYENBUHL, H.; YASARGIL, M. G.: Radiological anatomy and topography of the cerebral arteries; in VINKEN and BRUYN Handbook of clinical neurology, vol. 11, pp. 65-101 (North-Holland, Amsterdam 1972).
- KUNZ, J.: Strömungsmechanik und Endothelregeneration. Anat. Anz. 142: 32-36 (1977).
- KUNZ, J.; SCHREITER, B.; SCHUBERT, B.; VOSS, K.; KRIEG, K.: Experimentelle Untersuchungen über die Regeneration der Aortenendothelzellen. Acta histochem. 61: 53-63 (1978).
- LAITINEN, L.: Mediadefekter i hjärnartärerna hos nyfödda. Nord. Med. 65: 137-199 (1961).
- LANG, J.: Mikroskopische Anatomie der Arterien. Angiologica, Basel 2: 225-284 (1965).
- LANG, J.; BRUNNER, F. X.: Über die Rami centrales der Aa. cerebri anterior und media. Morph. Jb. 124: 364-374 (1978).
- LANG, J.; DEHLING, U.: A. cerebri media, Abgangszonen und Weiten ihrer Rami corticales. Acta anat. 108: 419-429 (1980).
- LANZ, T. von; WACHSMUTH, W.: Praktische Anatomie. vol. I/1B, Kopf, Teil B Gehirn- und Augenschädel (Springer, Berlin 1979).
- LAZORTHES, G.: The Arterial circle of the brain (Circulus arteriosus cerebri). Anat. Clinica 1: 241-257 (1979).
- LOCKSLEY, H. B.: Report on the cooperative study of intracranial aneurysms and subarachnoid hemorrhage. J. Neurosurg. 25: 219-239; 321-368 (1966).
- LÜBBERS, D. W.: Physiologie der Gehirndurchblutung; in GÄNSHIRT der Hirnkreislauf, pp. 214-260 (Thieme, Stuttgart 1972).
- MÄRK, W.: Zur Kenntnis der sog. Arterienwülste beim Menschen und bei einigen Säugern. Anat. Nachr. 1: 305-318 (1951).
- MCDONALD, D. A.; POTTER, J. M.: Bloodflow in the circle of Willis. J. Physiol., Lond. 108: 34P (1948).
- MCDONALD, D. A.; POTTER, J. M.: Direct observation of streamlines in the basilar artery. J. Physiol., Lond. 109: 17P-18P (1949).
- MERREM, B.: Modellversuche zur Hämodynamik intrakranieller Aneu-

- rysmen. Zbl. Neurochir. 35: 35-49 (1974).
- MITTERWALLNER, F. von: Variationsstatistische Untersuchungen an den basalen Hirngefäßen. Acta anat. 24: 51-88 (1955).
- MOFFAT, D. B.: The embryology of the arteries of the brain. Ann. roy. Coll. Surg. Engl. 30: 368-382 (1962).
- NANDA, B. S.; GETTY, R.: Presence of valve in the cerebral arteries of the dog and pig. Anat. Anz. 132: 75-78 (1972a).
- NANDA, B. S.; GETTY, R.: Intimal cushions of the cerebral arteries and their changes with age in the dog and pig. Anat. Anz. 132: 79-85 (1972).
- NOELL, W.; SCHNEIDER, M.: Zur Hämodynamik der Gehirndurchblutung bei Liquordrucksteigerung. Arch. Psych. 180: 713-730 (1948).
- PADGET, D. H.: The development of the cranial arteries in the human embryo. Contrib. Embryol. Carneg. Inst. 32: 205-261 (1948).
- PEDLEY, T. J.: The fluidmechanics of large blood vessels (Cambridge University press, Cambridge 1980).
- PIA, H. W.; LANGMAID, C.; ZIERSKI, J.: Cerebral aneurysms (Springer, Berlin 1979).
- PRANDTL, L.; OSWATITSCH, K.; WIEGHARDT, K.: Führer durch die Strömungslehre; 7. Aufl. (Vieweg, Braunschweig 1969).
- QUANDT, J.; SOMMER, H.: Die zerebrale Arteriosklerose; in QUANDT die zerebralen Durchblutungsstörungen des Erwachsenenalters, pp. 601-644 (Volk und Gesundheit, Berlin 1969).
- REIDY, M. A.; BOWYER, D. E.: Scanning electron microscopy of arteries; the morphology of aortic endothelium in haemodynamically stressed areas associated with branches. Atherosclerosis 26: 181-194 (1977).
- RICKENBACHER, J.: Der subocipitale und der intrakraniale Abschnitt der Arteria vertebralis. Z. Anat. EntwGesch. 124: 171-178 (1964).
- RICKENBACHER, J.: Embryologie der Hirngefäße; in GÄNSHIRT der Hirnkreislauf, pp. 1-24 (Thieme, Stuttgart 1972a).
- RICKENBACHER, J.: Normale und pathologische Anatomie des Hirngefäßsystems; in GÄNSHIRT der Hirnkreislauf, pp. 25-46 (Thieme, Stuttgart 1972b).
- ROACH, M. R.; BURTON, A. C.: Reason for the shape of the distensibility curves of arteries. Canad. J. Biochem. Physiol. 35: 681-690 (1957).
- ROACH, M. R.; SCOTT, S.; FERGUSON, G. G.: The hemodynamic importance of the geometry of bifurcations in the circle of Willis. Stroke 3: 255-267 (1972).
- ROBERTSON, J. H.: Stress zones in the foetal arteries. J. clin. Pathol. 13: 133-139 (1960).
- RODBARD, S.: VAScular modifications induced by flow. Am. Heart J. 51: 926-942 (1956).
- ROMEIS, B.: Mikroskopische Technik (Oldenbourg, München 1968).
- ROSEN, W. C.: The morphology of valves in cerebral arteries of the rat. Anat. Rec. 157: 481-488 (1967).

- ROSS, R.; GLOMSET, J. A.: Atherosclerosis and the arterial smooth muscle cell. *Science* 180: 1332-1339 (1973).
- ROSS, R.; GLOMSET, J.; KARIYA, B.; HARKER, L.: A platelet dependent serum factor that stimulates the proliferation of arterial smooth muscle cells in vitro. *Proc. nat. Acad. Sci.* 71: 1207-1210 (1974).
- ROTTER, W.; WELLMER, H.K.; HINRICHS, G.; MÜLLER, W.: Zur Orthologie und Pathologie der Polsterarterien (sog. Verzweigungs- und Spornpolster) des Gehirns. *Beitr. pathol. Anat.* 115: 253-294 (1955).
- SAEKI, N.; RHOTON, A. L.: Microsurgical anatomy of the upper basilar artery and the posterior circle of Willis. *J. Neurosurg.* 46: 563-578 (1977).
- SCHERER, P. W.: Flow in axisymmetrical glass model aneurysms. *J. Biomech.* 6: 695-700 (1973).
- SCHMUTZ, H. K.: Angaben zu den Variationen des Circulus arteriosus cerebri Willisii; *Anthropol. Halbpraktikum Zürich* (1975).
- SCHMUTZ, H. K.: Untersuchung über die Einmündungen der Venae cerebrales superiores und die Zusatzstrukturen im Sinus sagittalis superior; *Dipl. Arbeit Zürich* (1977).
- SCHMUTZ, H. K.: The chordae Willisii in the superior sagittal sinus: Morphology and classification. *Acta anat.* 108: 94-97 (1980).
- SCOTT, S.; FERGUSON, G. G.; ROACH, M. R.: Comparison of the elastic properties of human intracranial arteries and aneurysms. *Canad. J. Physiol. Pharmacol.* 50: 328-332 (1972).
- SERBAN, M.; VUIA, O.: Arterielle Sphincteren des menschlichen Grosshirns. *Acta anat.* 46: 81-90 (1961).
- SEYDEL, H. G.: The diameters of the cerebral arteries of the human fetus. *Anat. Rec.* 150: 79-88 (1964).
- STAUBESAND, J.: Spezifische Ausprägungen, Fensterungen und Umbauvorgänge der Membrana elastica interna; *Experimentelle elektronenmikroskopische Untersuchungen an Arterien muskulären Typs. Verh. anat. Ges., Jena* 73: 767-77 (1979).
- STEBBENS, W. E.: Medial defects of the cerebral arteries of some mammals. *Nature, Lond.* 179: 327-328 (1957).
- STEBBENS, W. E.: Medial defects of the cerebral arteries of man. *J. Pathol. Bact.* 78: 179-185 (1959).
- STEBBENS, W. E.: Flow in experimental models simulating intravascular cords traversing the arterial lumen. *Vascular Surg.* 9: 132-140 (1975).
- STOPFORD, J. S. B.: The arteries of the pons and medulla oblongata. *J. Anat., Lond.* 50: 131-164 (1916).
- STRANDNESS, D. E.; SUMNER, D. S.: *Hemodynamics for surgeons* (Grune & Stratton, New York 1975).
- SUZUKI, J.; OHARA, H.: Origin, rupture and growth of cerebral aneurysms: a clinicopathological study! in *PIA cerebral Aneurysms*, pp. 28-41 (Springer, Berlin 1979).

- TAKAYANAGI, T.; RENNELS, M. L.; NELSON, E.: A electron microscopic study of intimal cushions in intracranial arteries of the cat. *Am. J. Anat.* 133: 415-429 (1972).
- TEUFEL, J.: Einbau der Arteria carotis interna in den Canalis caroticus unter Berücksichtigung des transbasalen Venenabflusses. *Morph. Jb.* 106: 188-274 (1964).
- TEXON, M.: The hemodynamic concept of atherosclerosis. *Arch. Sur.*, Chicago 80: 47-53 (1960).
- THOMA, R.: zit. nach WELLMER, H. K.: Über die Polsterarterien des Gehirns; med. Diss. Kiel (1952).
- TÖNDURY, G.: Angewandte und topographische Anatomie; 3. Aufl. (Thieme, Stuttgart 1965).
- TOOLE, J. F.; PATEL, A. N.: Zerebro-vaskuläre Störungen (Springer, Berlin 1980).
- TURNER, R. S.: A comparison of theoretical with observed angles between the vertebral arteries at their junction to form the basilar. *Anat. Rec.* 129: 243-253 (1957).
- TUTHILL, C. R.: Cerebral aneurysms. *Arch. Pathol.* 16: 630-642 (1933).
- VONCKEN, J.: Über histologische Eigenarten der basalen Hirnarterien. *Frankf. Z. Pathol.* 42: 481-493 (1931).
- VRIESE, B. de : Entwicklungsgeschichte der Arteriae cerebrales anteriores. *Verh. anat. Ges.*, Würzburg 21: 125-129 (1907).
- WAGENVoORT, C. A.: Die Bedeutung der Arterienwülste für den Blutkreislauf. *Acta anat.* 21: 70-99 (1954).
- WALMSLEY, J. G.; CANHAM, P. B.: Orientation of nuclei as indicators of smooth muscle cell alignment in the cerebral artery. *Blood Vessels* 16: 43-51 (1979).
- WATTS, J. W.: A comparative study of the anterior cerebral artery and the circle of Willis in primates. *J. Anat.*, Lond. 68: 534-550 (1934).
- WEIBEL, E.: Die Entstehung der Längsmuskulatur in den Ästen der A. bronchialis. *Z. Zellforsch.* 47: 440-468 (1958).
- WELLMER, H. K.: Über die Polsterarterien des menschlichen Gehirns; med. Diss. Kiel (1952).
- ZEAL, A. A.: Microsurgical anatomy of the posterior cerebral artery. *J. Neurosurg.* 48: 534-559 (1978).
- ZOLNAI, B.: Die zwischen der Arteria vertebralis und den vertebralen und zerebralen Venen bestehende Verbindung am atlanto-okzipitalen Abschnitt beim Menschen. *Anat. Anz.* 114: 400-407 (1964).

X. TABELLEN UND ABBILDUNGEN

Tab. I Das praenatale Untersuchungsgut (nach Altersstufen geordnet)

SSL (mm)	Anzahl Individuen	Anzahl Proben
25	1	14
30	1	20
50	1	10
55	1	20
96	1	21
150	1	11
210	1	20
300	1	19
Σ	8	135

Tab. II Das postnatale Untersuchungsgut (nach Altersstufen geordnet)

Altersstufe	Anzahl Individuen	Anzahl Proben
0 - 4 $\frac{11}{12}$	8	27
5 - 9 $\frac{11}{12}$	2	21
10 - 14 $\frac{11}{12}$	1	13
15 - 19 $\frac{11}{12}$	3	13
20 - 29 $\frac{11}{12}$	6	32
30 - 39 $\frac{11}{12}$	5	43
40 - 49 $\frac{11}{12}$	5	42
50 - 59 $\frac{11}{12}$	6	10
Σ	36	201

Tab. III Bauart der Membrana elastica interna an ausgewählten Schnittstellen

Schnittstellen	1*	3*	12*	14*	2'	4'	11'	13'
Anzahl Proben	(n) 18	12	15	28	14	18	16	14
dupliziert	(%) 33,5	16,5	13	22	20	10	63	17
aufgesplittet	(%) 46,5	41,5	53	68	55	90	63	66
deutlich verdickt	(%) 20	33,5	34	10	25	50	81	17
Die lumenwärts gerichtete Oberfläche ist schwach eingekerbt	(%) 0	8,5	7	18	27	7	37	14
Die lumenwärts gerichtete Oberfläche ist stark eingekerbt	(%) 100	100	93	82	73	93	63	86

' Verzweigungsstelle

* unverzweigter Gefäßabschnitt

Tab. IV Bauart der Membrana elastica interna mit zunehmendem Alter

Altersstufen	0-9 ¹¹ /12	10-19 ¹¹ /12	20-29 ¹¹ /12	30-39 ¹¹ /12	40-49 ¹¹ /12
Anzahl Proben	(n) 48	23	18	44	20
verdoppelt	(%) 39,5	22	22,5	29,5	35
aufgesplittet	(%) 42	70	78	70,5	55
deutlich verdickt	(%) 19	17,5	28	36,5	75

Die lumenwärts gerichtete

Oberfläche ist schwach
eingekerbt

Die lumenwärts gerichtete
Oberfläche ist stark
eingekerbt

0

100

Tab. V Elastische Elemente an der Grenze zwischen T. media und T. adventitia
an ausgewählten Schnittstellen

Schnittstellen	1*	2´	3*	4´	11´	12*	13´	14*
Anzahl Proben	18	14	12	18	16	15	14	28
nur geringfügig mit elastischen Fasern durchsetzt (%)	100	100	100	100	100	93	64	3,5
<u>dicht mit elastischen Fasern durchsetzt (%)</u>	0	0	0	0	0	7	36	96,5
einzelne isolierte elastische Fasern an wenigen Abschnitten des Querschnittes	38,5	40	25	44,5	72,5	35,5	11	0
isolierte elastische Fasern an mehreren Abschnitten des Querschnittes	61,5	60	75	55,5	27,5	64,5	89	100

´ Verzweigungsstelle

* unverzweigter Gefäßabschnitt

Tab. VI Häufigkeit der Mediaschwachstellen an ausgewählten Schnittstellen

Schnittstellen	Anzahl Proben	Prozentsatz mit Mediaschwachstellen
1*	18	0 %
2 [^]	14	86%
3*	12	15%
4 [^]	18	68%
11 [^]	16	36%
12*	15	13%
13 [^]	14	28%
14*	28	3 %

* unverzweigte Gefässabschnitte

[^] Verzweigungsstellen

Tab. VII Häufigkeit der Mediaschwachstellen mit zunehmendem Alter

Altersstufen	Anzahl Proben	Prozentsatz mit Mediaschwachstellen	
		Bifurkationen	unverzweigte
0 - 9 ¹¹ /12	45	36,5%	4,5%
10 - 19 ¹¹ /12	25	66,5%	6,5%
20 - 29 ¹¹ /12	31	78,5%	12 %
30 - 39 ¹¹ /12	45	61,5%	9,5%
40 - 49 ¹¹ /12	44	63,5%	15,5%

Tab. VIII Verankerungsarten von 128 Intimapolstern

	Anzahl Intimapolster	Prozentsatz
ohne spezielle Verankerung	39	30,5%
mit spezieller Verankerung	89	69,5%
Σ	128	100%
longitudinal angeordnete Muskelzüge	52	40,5%
lokale Verdickung der T. media	8	6 %
Mediaschwachstelle	29	22,5%
Netz aus elastischen Fasern	13	10 %

Tab. IX Anteil der drei Polstertypen

Polstertyp	Anzahl	Prozentsatz
Spornpolster	36	28 %
Trichterpolster	66	51,5%
isoliertes seitl.Einzel- polster	26	20,5%

Tab. X Verankerungsart der drei Polstertypen

	Spornpolster		Trichterpolster		isoliertes seitl. Einzelpolster	
	n	%	n	%	n	%
ohne spezielle Verankerung	5	14%	24	36,5%	10	38,5%
mit spezieller Verankerung	31	8,5%	42	63,5%	16	61,5%
longitudinal angeordnete Muskelzüge	21	58%	24	36,5%	7	27 %
lokale Verdickung der T. media	3	8,5%	3	4,5%	2	7,7%
Mediaschwachstellen	8	22%	16	24%	5	19%
Netz aus elastischen Fasern	7	19,5%	3	4,5%	3	11,5%

Tab. XI Verteilung der drei Polstertypen an Bifurkationen und unverzweigten Gefäßabschnitten

	unverzweigte Gefäßabschnitte	Bifurkationen
Spornpolster	0%	32%
Trichterpolster	85%	45%
isolierte seitliche Ein- zelpolster	15%	23%

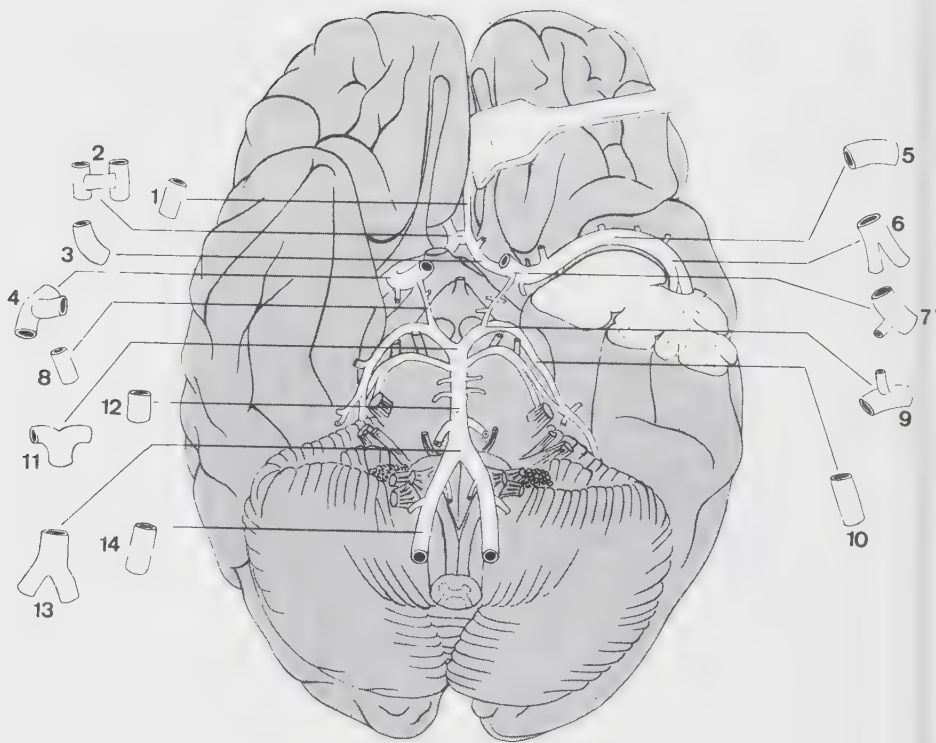


Abb.1 :

Lage der Schnittstellen an der Hirnbasis

Der Polus temporalis sinister ist zur Darstellung der A. cerebri media abgetragen.

(mod. nach TONDURY, 1965)

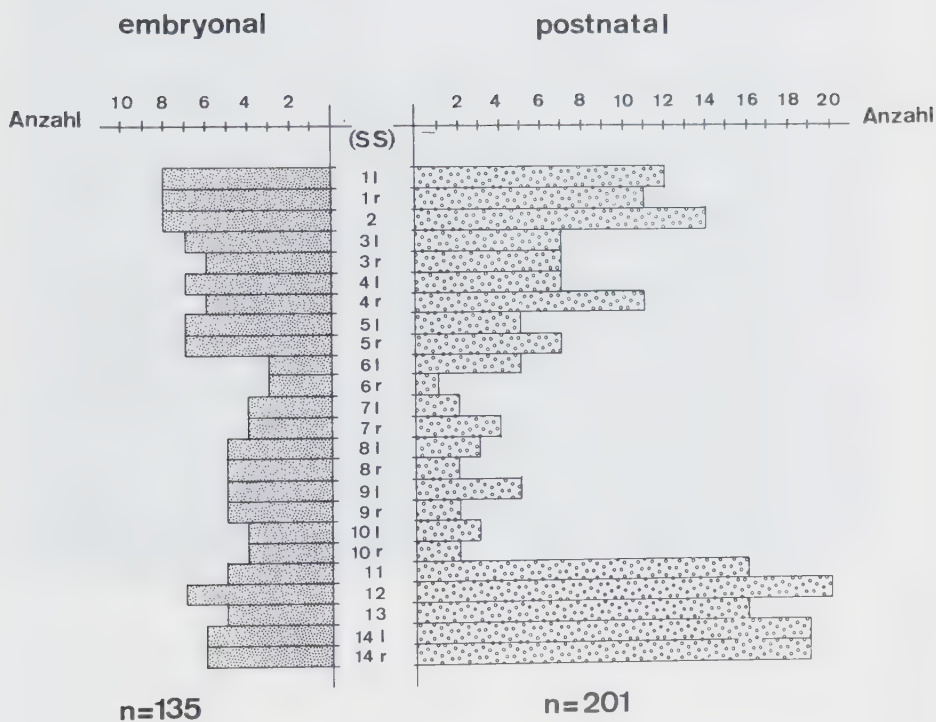


Abb. 2 : Anzahl der untersuchten Proben pro Schnittstelle
(n=336)



Abb.3 : Schwach markierte Grenzzone zwischen Tunica media und Tunica adventitia

↑ : elastische Grenzlamelle
 a : Tunica adventitia
 b : Tunica media

(P. praecommunicans a. cerebri anterior, 8⁵/12
 jährig, Van Gieson-Elastin, Grünfilter, 120 : 1)

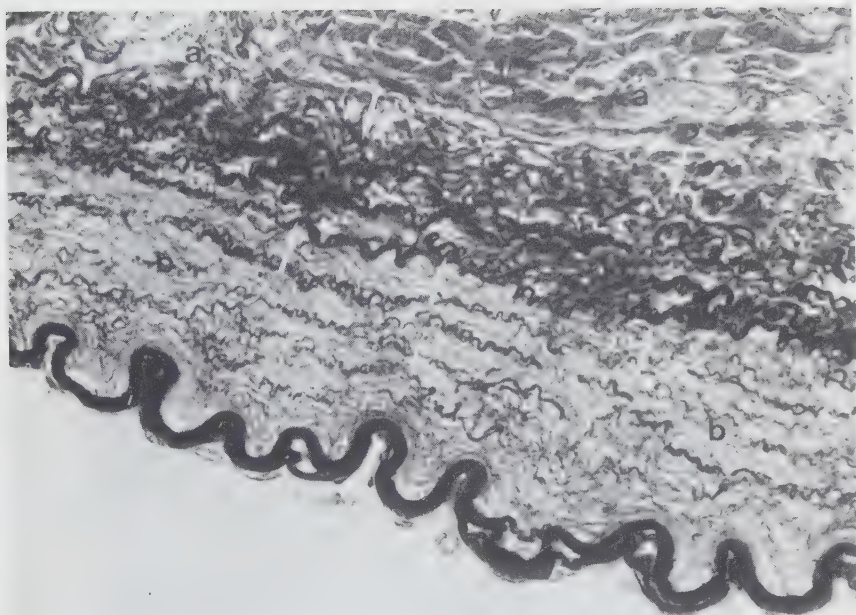


Abb.4 : Dicht mit elastischem Gewebe durchsetzte
Grenzzone

↑ : elastische Grenzlamelle
a : Tunica adventitia
b : Tunica media
(A. vertebralis sinister, männlich, 4 Monate alt,
Van Gieson-Elastin, Blaufilter, 120 : 1)

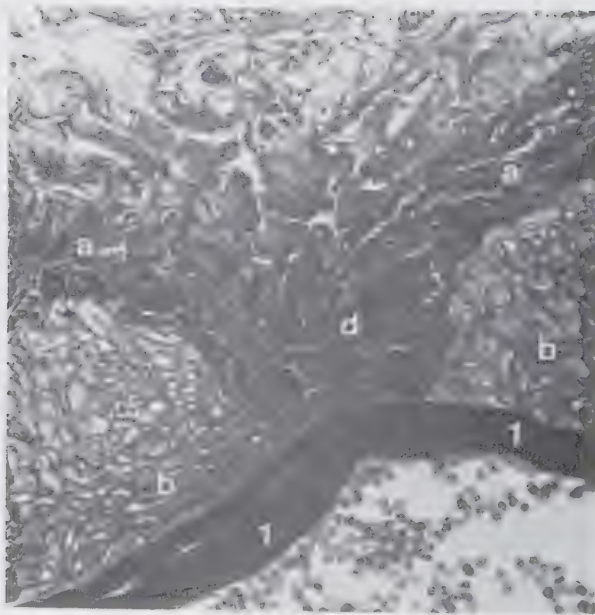


Abb.5 : Schwachstelle in der Tunica media

- a : Tunica adventitia
- b : Tunica media
- c : Arterienlumen
- d : kollagener Adventitiakeil
- l : Membrana elastica interna

(Bifurkation der A. basilaris, männlich, 47 jäh-
rig, Van Gieson-Elastin, Gelbfilter, 60 : 1)

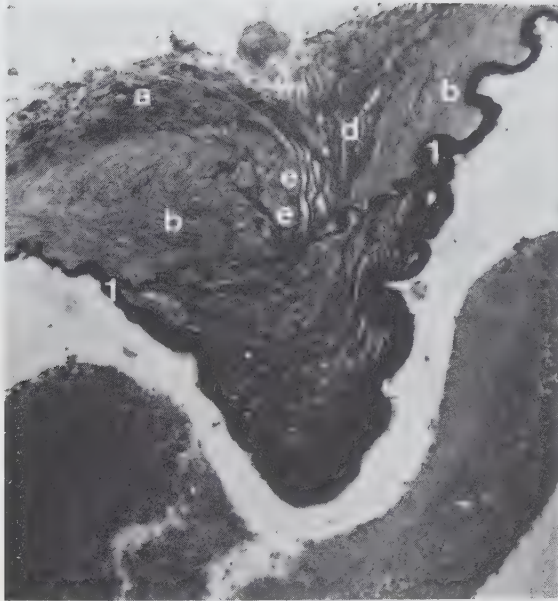


Abb.6 : Mediaschwachstelle mit eingelagerten Muskelzellen

a : Tunica adventitia
b : Tunica media
c : Intimapolster
d : kollagenes Gewebe
e : Muskelfasern im Lumen der Mediaschwachstelle
l : Membrana elastica interna
(A. communicans anterior, männlich, 4⁸/12 jährig, Van Gieson-Elastin, Grünfilter, 30 : 1)

Abb. 7 A : Intimapolster

(Aufteilung der A. carotis interna sinistra in die A. cerebri media und die A. cerebri anterior, männlich, 8 $\frac{5}{12}$ jährig, Van Gieson-Elastin, Grünfilter, 30 : 1)

B : Schemazeichnung

- a : Polsterraum
- b : Tunica media
- c : Tunica adventitia
- 1 : Membrana elastica interna
- 2 : Lamina elastica interna
- 3 : Lamina elastica limitans

A

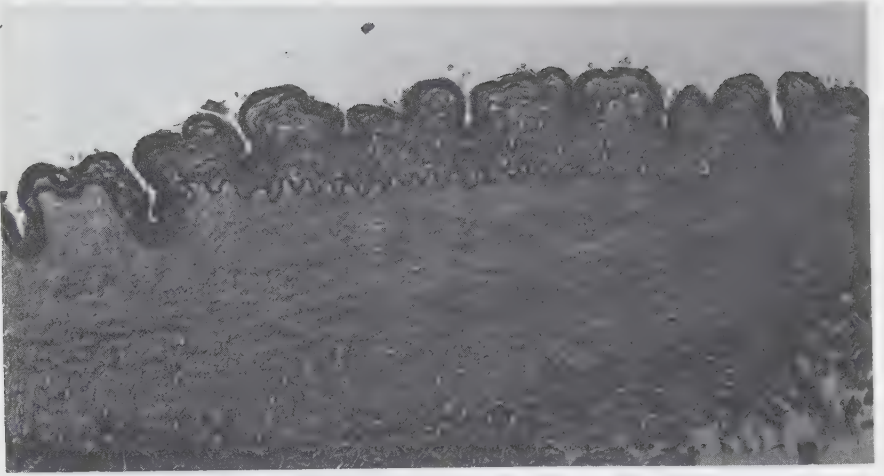


Abb.7

B

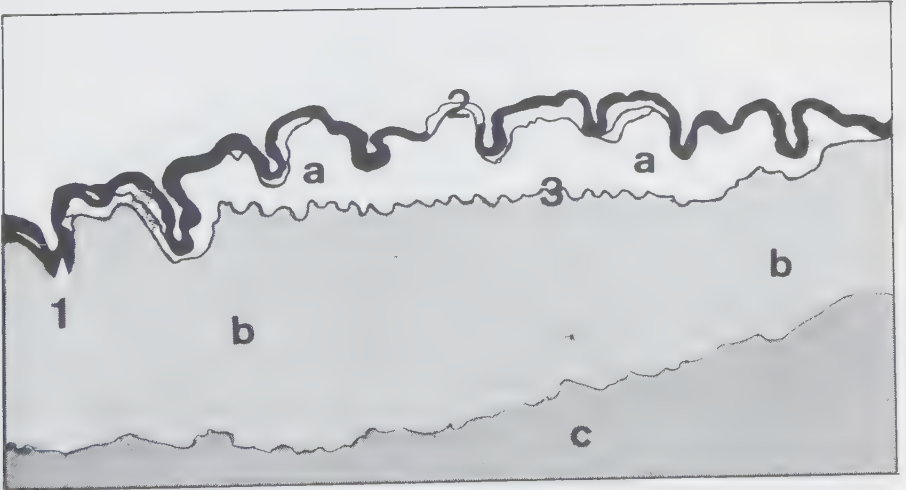
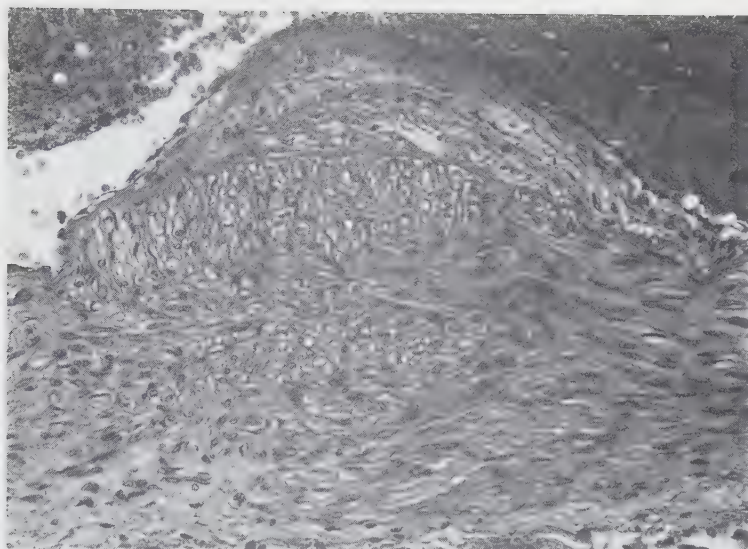


Abb. 8 A : Intimapolster mit longitudinal angeord-
neten Muskelzellen als Verankerungsele-
ment

(Zusammenfluss der beiden Aa. vertebrales, männ-
lich, 4 Monate alt, Haematoxilin-Eosin, Grünfilter,
60 : 1)

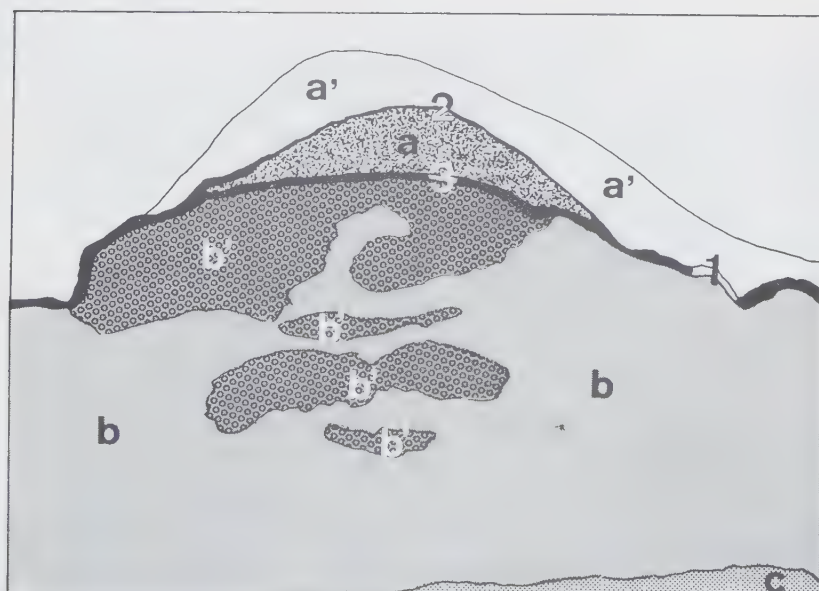
B : Schemazeichnung

a': sklerosierte Kappe
a : Polsterraum
b': longitudinal angeordnete Muskelzellen
b : Tunica media
c : Tunica adventitia
1 : Membrana elastica interna
2 : Lamina elastica interna
3 : Lamina elastica limitans



A

Abb. 8



B

Abb. 9 A : Mediaschwachstelle mit Intimapolster
kombiniert.

∇ : Mediaschwachstelle
(A. communicans anterior, männlich, 4⁸/12 jährig, Van Gieson-Elastin, Blaufilter, 18 : 1)

B : Gleichzeitiges örtliches Vorkommen von
Mediaschwachstellen und Intimapolstern.

∇ : Mediaschwachstelle
(Aufteilung der linksseitigen A. carotis interna
in die A. cerebri media und die A. cerebri anterior,
weiblich, 12¹⁰/12 jährig, Van Gieson-Elastin, Blau-
filter, 18 : 1)

A

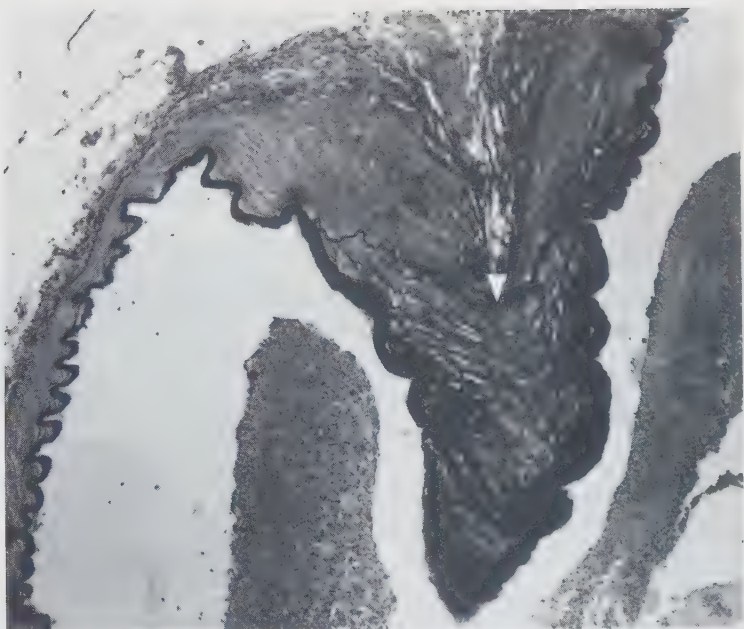
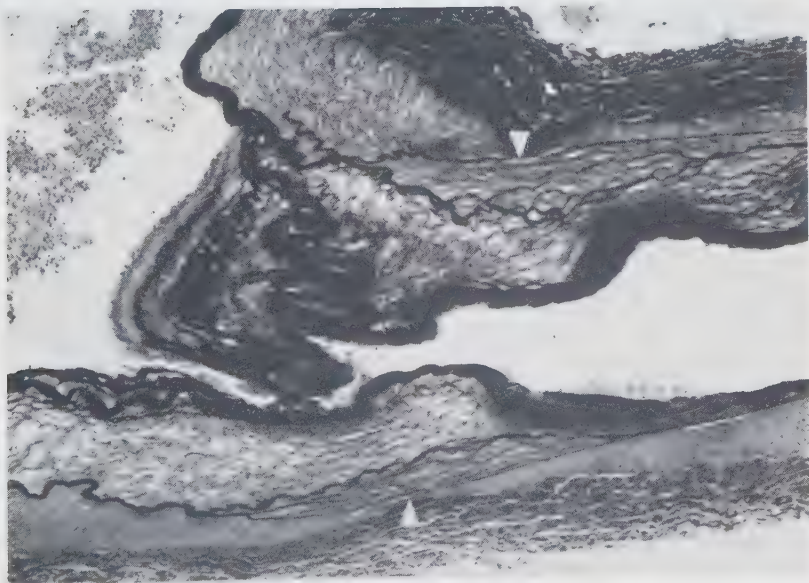


Abb. 9

B



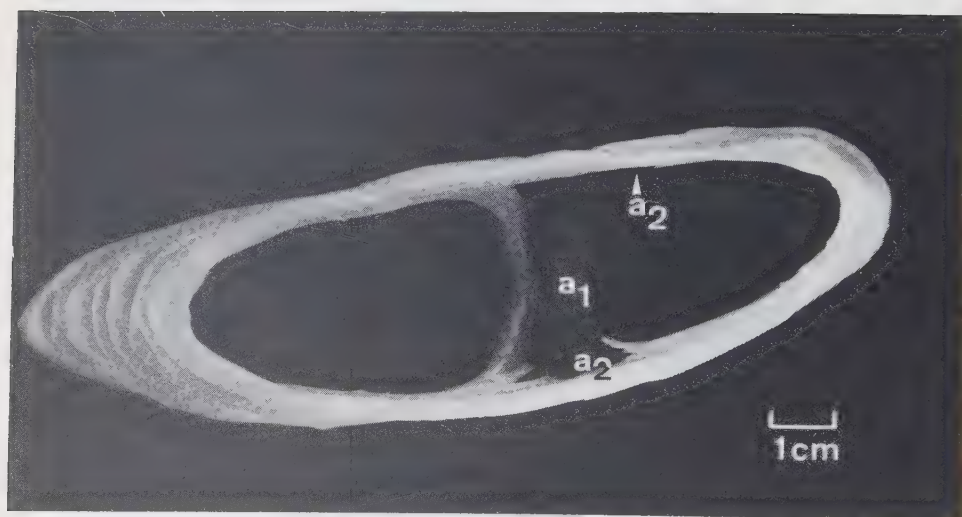


Abb.10 :

Spornpolster

a₁: apikaler Polsteranteil

a₂: longitudinale Polsterschenkel

(Wachsmodell, Zusammenfluss der beiden Aa. vertebrales, weiblich, 300 mm SSL, 30 : 1)

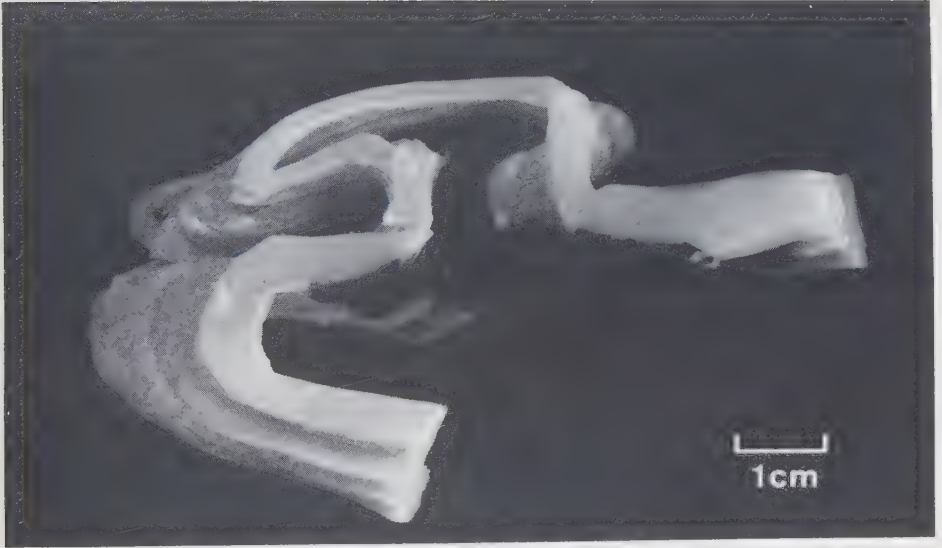


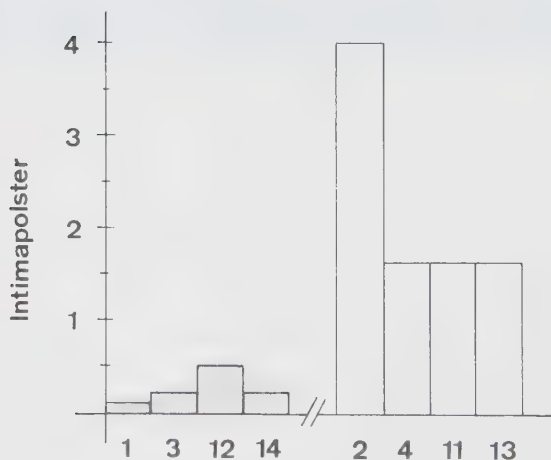
Abb.11 :

Trichterpolster

(Wachsmodell, A. basilaris mit Ramus ad pontem,
männlich, 4 Monate alt, 50 : 1)



Abb.12 : Isoliertes seitliches Einzelpolster
 c : Einzelpolster
 (Wachsmodell, Verzweigung der A. basilaris, männ-
 lich, 27 jährig, 25 : 1)



Schnittstellen

Abb.13 : Häufigkeit der Polster an geraden Gefäß-
 abschnitten und Bifurkationen
 1,3,12,14 : gerade Gefäßabschnitte
 2,4,11,13 : Bifurkationen

Abb. 14 : Konfluens der Aa. vertebrales (symmetrisch)

a : Spornpolster
 b : Trichterpolster
 ↑ : Flussrichtung des Blutes

A : Gesamtansicht
 B : Längsschnitt

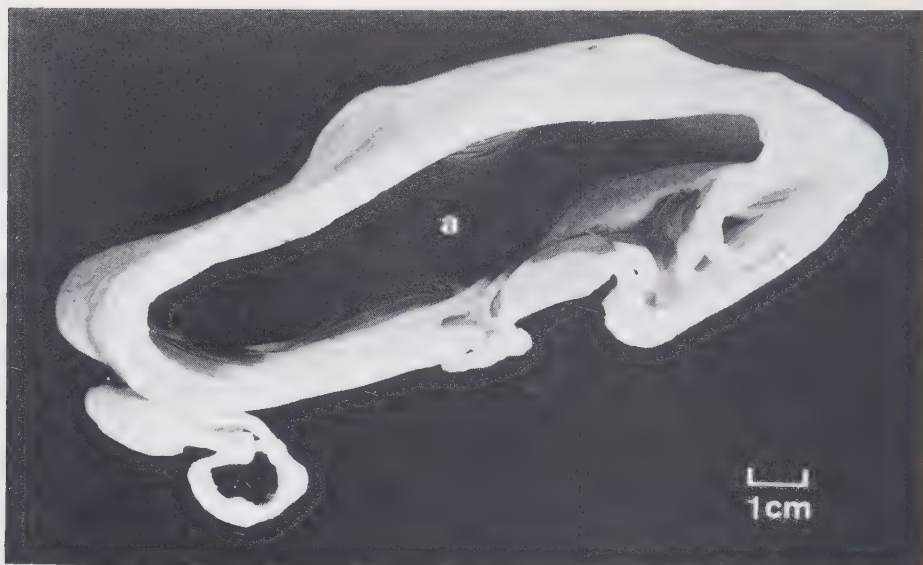
(Wachsmodell, männlich, 4 Monate alt, 25 : 1)

Abb. 15 : Konfluens der Aa. vertebrales (asymmetrisch)

a : Spornpolster
 ∇ : Mediaschwachstelle
 1 : Apex
 2 : A. basilaris
 3 : A. vertebralis sinistra
 4 : A. vertebralis dextra

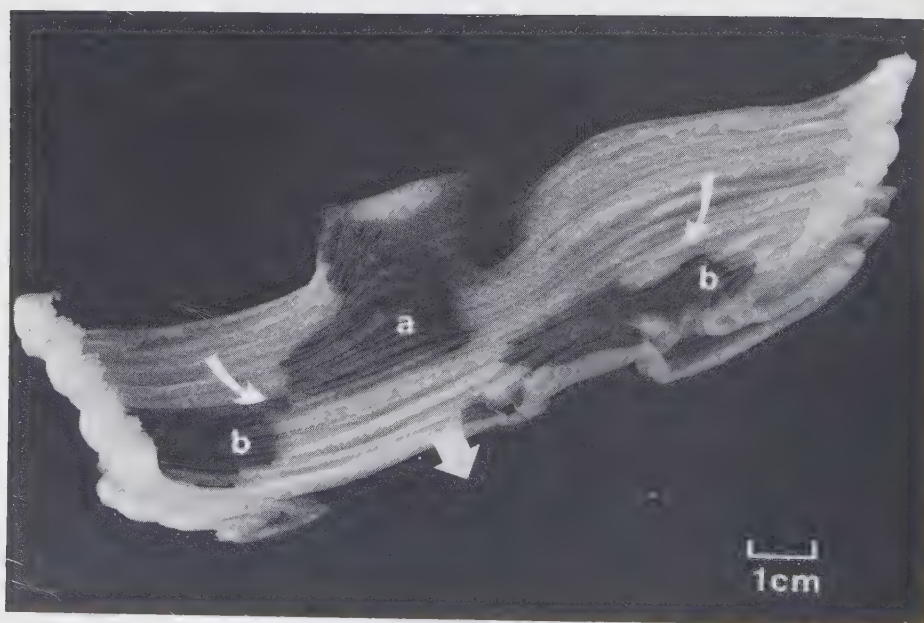
A : von der A. basilaris her gesehen
 B : von den Aa. vertebrales her gesehen

(Wachsmodell, weiblich, 39 jährig, 25 : 1)

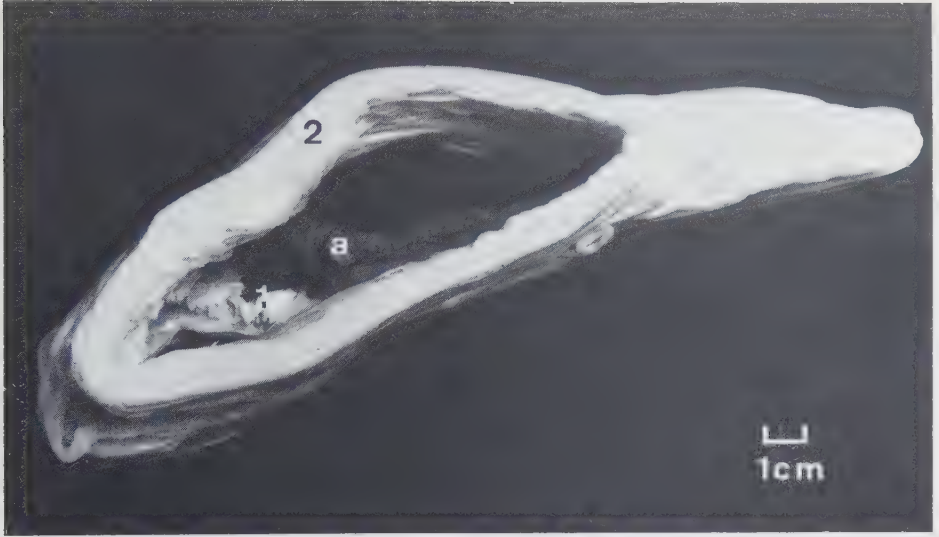


A

Abb.14

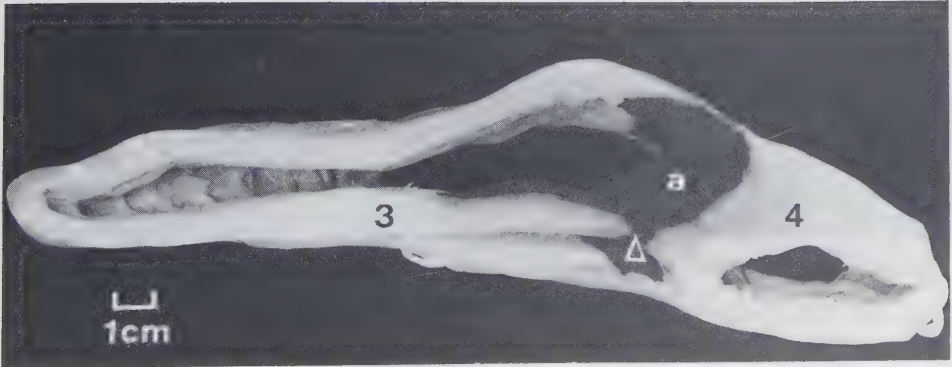


B



A

Abb.15



B

Abb. 16 : Symmetrische Teilung der A. basilaris

c : isoliertes seitliches Einzelpolster

1 : A. basilaris

2 : A. cerebri posterior dextra

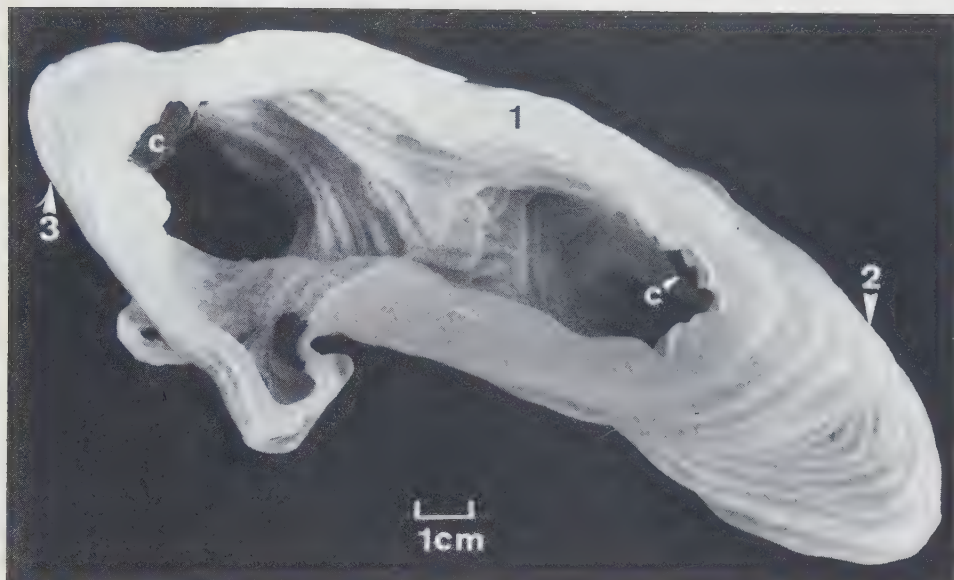
3 : A. cerebri posterior sinistra

↑ : Flussrichtung des Blutes

A : Gesamtansicht

B : Längsschnitt

(Wachsmodell, weiblich, 27 jährig, 25 : 1)



A

Abb.16



B

Abb. 17 : Symmetrische Teilung der A. basilaris

b : Trichterpolster

c : isoliertes seitliches Einzelpolster

1 : A. basilaris

2 : A. cerebri posterior dextra

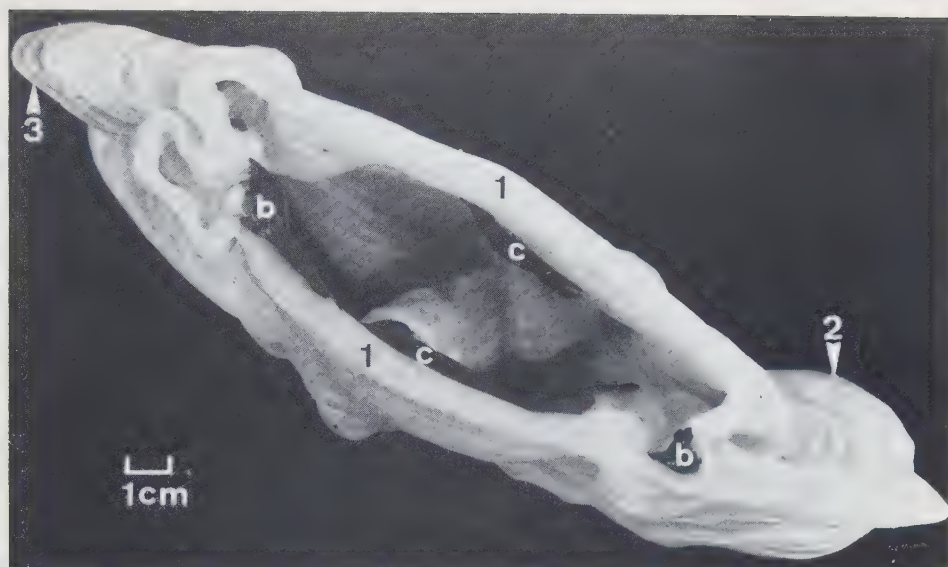
3 : A. cerebri posterior sinistra

↑ : Flussrichtung des Blutes

A : Gesamtansicht

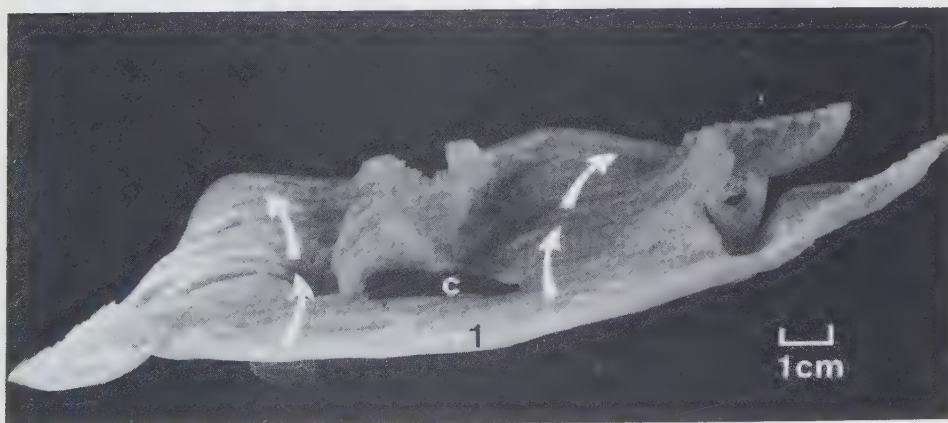
B : Längsschnitt

(Wachsmodell, männlich, 4 Monate alt, 25 : 1)



A

Abb.17



B

Abb. 18 : Symmetrische Teilung der A. basilaris

a : Spornpolster

c : isoliertes seitliches Einzelpolster

1 : A. basilaris

2 : A. cerebri posterior sinistra

3 : A. cerebri posterior dextra

(Wachsmodell, weiblich, 33 jährig, 25 : 1)

Abb. 19 : Verzweigung der A. carotis interna in
ihre Endäste

a : Spornpolster

c : isoliertes seitliches Einzelpolster

1 : A. carotis interna

2 : A. cerebri anterior

3 : A. cerebri media

(Wachsmodell, weiblich, 12¹⁰/12 jährig, 25 : 1)



Abb.18

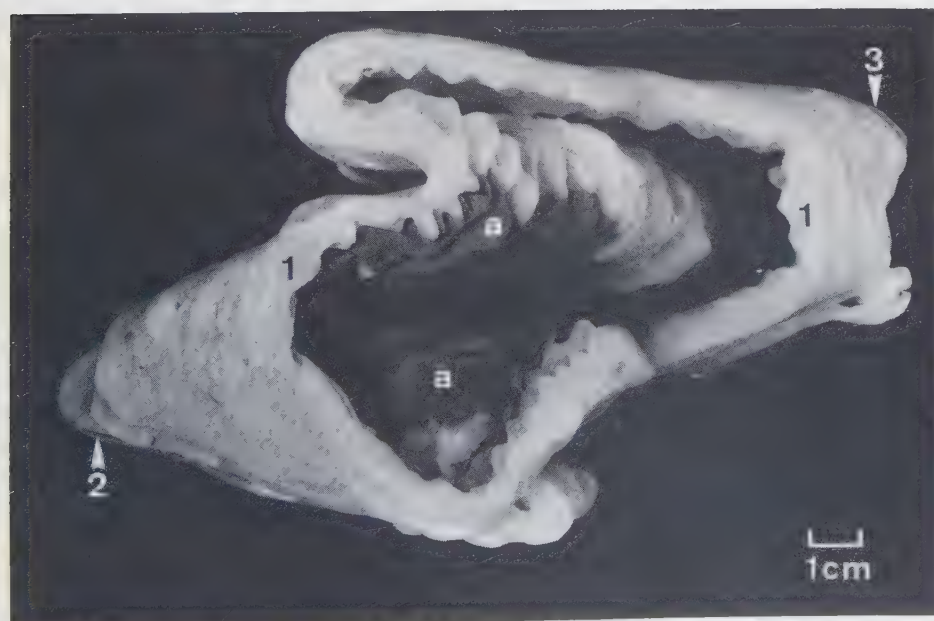


Abb.19

Abb. 20 : Verzweigung der A. carotis interna in
ihre Endäste

- a : Spornpolster
- b : Trichterpolster
- c : isoliertes seitliches Einzelpolster
- 1 : A. carotis interna
- 2 : A. cerebri media
- 3 : A. cerebri anterior
- ∇ : Mediaschwachstelle
- ↑ : Flussrichtung des Blutes

(Wachsmodell, weiblich, 17 jährig, 25 : 1)

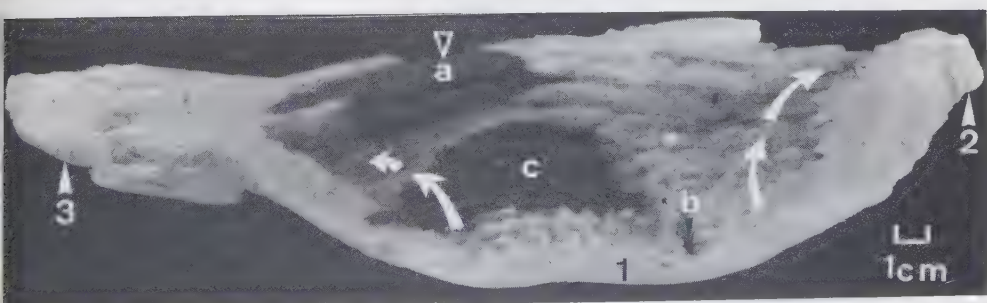
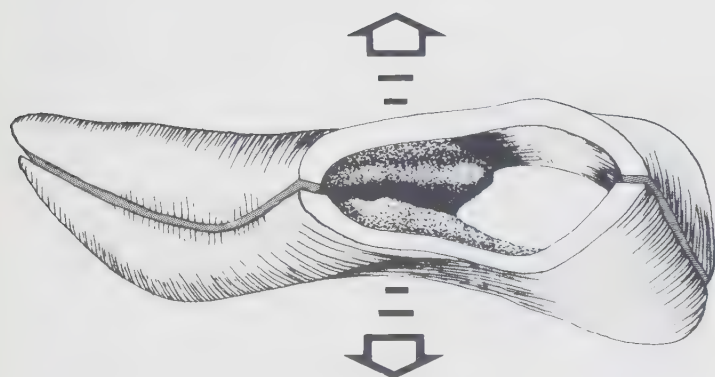
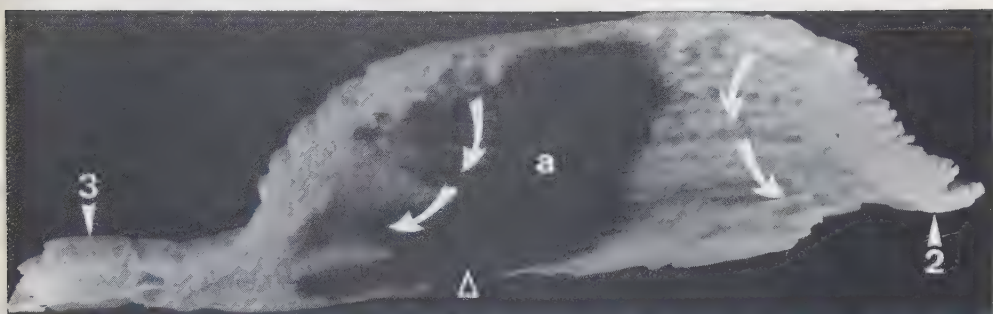


Abb. 20

Abb. 21 : A. communicans anterior
b : Trichterpolster
1 : A. cerebri anterior dextra
2 : A. cerebri anterior sinistra
3 : A. communicans anterior
↑ : Flussrichtung des Blutes
(Wachsmodell, weiblich, 17 jährig, 25 : 1)

Abb. 22 : A. communicans anterior
1 } A. cerebri anterior dextra
2 }
3 } A. cerebri anterior sinistra
4 }
↑ : Flussrichtung des Blutes
(Wachsmodell, weiblich, 60 jährig, 25 : 1)

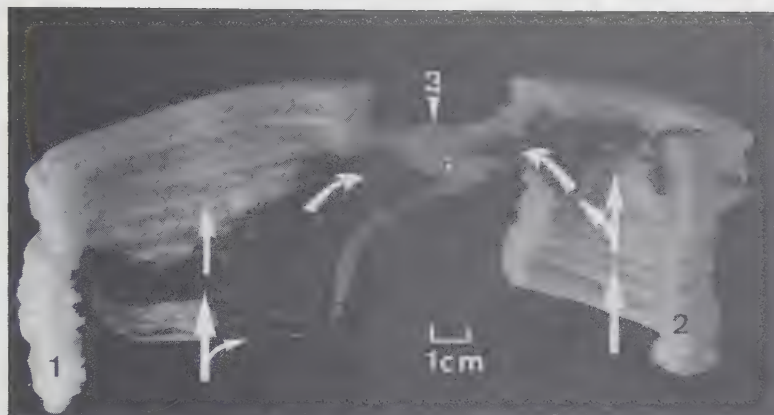


Abb.21



Abb.22

- Abb. 23 : Einzelne Abschnitte des Circulus arteriosus
(Van Gieson-Elastin, 120:1)
- A : Verzweigung der A. carotis interna in ihre
Endäste
(8 ⁵/12 jährig, Grünfilter)
- B : Pars sphenoidalis a. cerebri media
(männlich, 4 ⁸/12 jährig, Grünfilter)
- C : Partes prae- et postcommunicalis a. cerebri
anterior
(männlich, 4 ⁸/12 jährig, Grünfilter)
- D : A. communicans anterior
(Männlich, 4 Monate alt, Gelbfilter)
- E : Pars carotica a. communicans posterior
(weiblich, 19 Tage alt, Gelbfilter)
- F : A. vertebralis
(männlich, 4 Monate alt, Gelbfilter)
- G : A. basilaris
(männlich, 4 ⁸/12 jährig, Gelbfilter)
- H : A. cerebri posterior
(männlich, 4 Monate alt, Blaufilter)

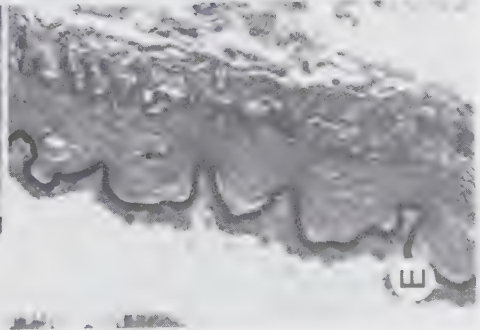
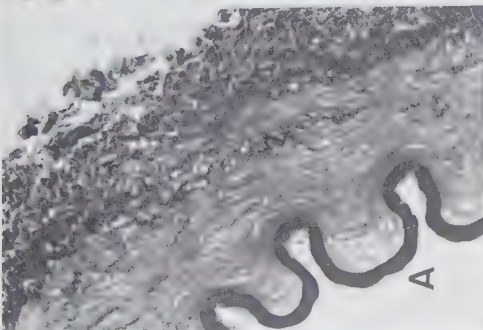
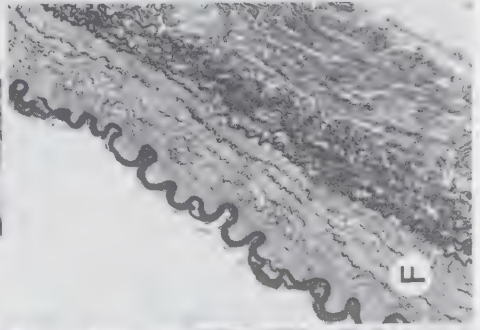
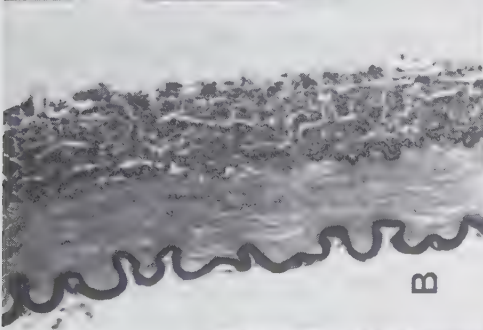
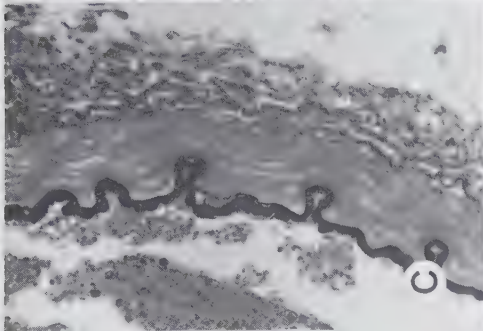
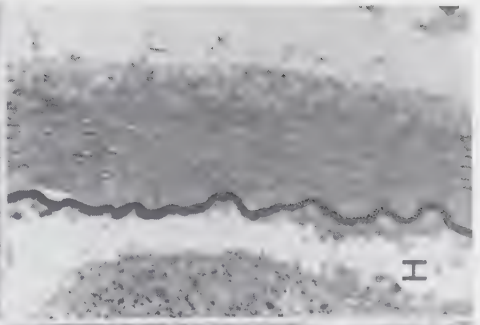
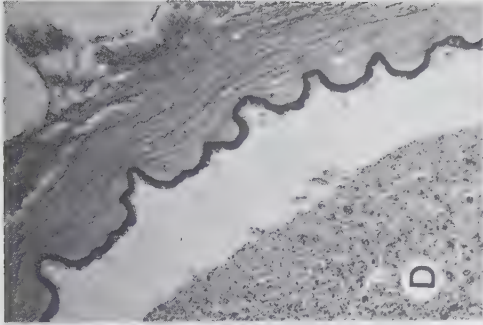


Abb. 23

Anmerkung : In die Legende der Mikrophotographien
 wurde der Abbildungsmaassstab der Negative
 mit aufgenommen. Bei den Wachsmodeilen
 wurde dagegen der Modellmaassstab und
 nicht der Abbildungsmaassstab berück-
 sichtigt

curriculum vitae

Geboren wurde ich, Hans-Konrad Schmutz, am 7. April 1951 in Winterthur als Bürger von Vechingen BE und Winterthur. In Winterthur wuchs ich auf und besuchte die Volks- und Kantonschule. An der Lehramtsschule schloss ich meine Mittelschul-ausbildung im Herbst 1971 mit der Maturitätsprüfung ab.

Die Immatrikulation an der Philosophischen Fakultät II der Universität Zürich erfolgte zu Beginn des Wintersemesters 1971/72 für das Hauptfach Anthropologie. Ich besuchte Vorlesungen und Kurse der nachstehenden Dozenten: K. Akert, M. Anliker, R. Bachofen, E. Batschelet, J. Biegert, P.S. Chen, Ph. Christen, H. Hediger, H.R. Hohl, R. Humbel, R. Hunsperger, J. Kägi, H.M. Koelbing, E.A. Koller, St. Kubik, E. Kuhn-Schnyder, H. Oswald, J. Rickenbacher, H. Rieber, H. Schmid, W. Schmid, P. Tardent, K. Theiler, G. Töndury, J. Wellauer, E. Wiesmann, R. Wyler, O.A.M. Wyss, G.M. Yasargil, M.G. Yasargil, V. Ziswiler.

Das Diplom in Anthropologie erwarb ich im Wintersemester 1977/78. Die vorliegende Dissertation entstand unter der Leitung der Herren Prof. Dr. med. St. Kubik und Prof. Dr. med. J. Biegert. Zur Zeit bin ich als Assistent am Anthropologischen Institut der Universität beschäftigt.

